



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH A KONTROLA PARAMETRŮ ZÁSOBNÍ SMYČKY
LINKY PRO ZPRACOVÁNÍ PLECHU**

DESIGN AND EXAMINATION OF PARAMETERS OF THE LINE STOCK LOOP FOR SHEET METAL
PROCESSING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kubík, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Tomáš Novák
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	Ing. Petr Kubík, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a kontrola parametrů zásobní smyčky linky pro zpracování plechu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zásobní smyčka v lince pro zpracování pásu plechu je určena pro vyrovnání okamžitého rozdílu mezi délkou pásu odvíjeného ze svitku a požadovanou délkou pásu na vstupu linky. Na pásu v zásobní smyčce nesmí dojít ke vzniku plastických deformací. Práce bude řešena ve spolupráci s průmyslovým partnerem ŽDAS, a.s.

Cíle diplomové práce:

Řešitel, pro účely posouzení rizika vzniku plastických deformací, stanoví stav napjatosti na pásu v závislosti na délce smyčky, tloušťce pásu, délce pásu ve smyčce, případně dalších parametrech.

Seznam doporučené literatury:

PETRUŠKA, J. MKP v inženýrských výpočtech. Brno. Dostupné na webové stránce: <http://www.umat.fme.vutbr.cz/cs/studium/studijni-materialy.html>.

ŠEBEK, F. Rovnění vývalku opakovanou plastickou deformací. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

MARCINIAK, Z. Teorie tváření plechů. SNTL Praha, 1975.

ŠEBEK, F. Výpočtová analýza rovnání čtvercových tyčí. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., BURŠA, J. Mechanika těles: Pružnost a pevnost I. Nakladatelství VUT Brno, 2003.

LIU, Z., WANG, Y., YAN X. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method. International Journal of Mechanical Sciences. 2012, 54(1), 213-224.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá stanovením napjatostně deformačních stavů pásu plechu v zásobních smyčkách o nestandardních rozměrech. Hlavním cílem práce je vytvoření výpočtového modelu a stanovení maximální možné zásoby pro všechny zadané parametry smyčky. Problém této diplomové práce byl řešen metodou konečných prvků v programu ANSYS. Dosažené výsledky budou použity ve společnosti ŽĎAS, a.s. k návrhu linek na zpracování plechu o nestandardních rozměrech. Dalším cílem bylo odhadnout, jaký vliv na napjatost bude mít zahrnutí residuálního napětí vznikajícího v plechu během předchozích výrobních operací.

Klíčová slova

pás plechu, zásobní smyčka, linka na zpracování plechu, mezní stav,

ABSTRACT

Master thesis is focused on determination of stress and deformation state of metal sheet in stock loops of non-standard dimension. The main goal was creating numerical model and determination of maximal possible stock of metal sheet for all requested parameters. The problem was solved using Finite element methods in the software ANSYS. Results were handed to ŽĎAS, a.s. corporation, where they will be used for design of the lines for metal sheet processing of non-standard dimension. Another goal was estimation, how the residual stress in metal sheet can effect the observed stress state.

Key words

metal sheet, stock loop, line for metal sheet procesing, limit state,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, Tomáš. *Návrh a kontrola parametrů zásobní smyčky linky pro zpracování plechu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123732>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Kubík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh a kontrola parametrů zásobní smyčky linky pro zpracování plechu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21. června 2020

Tomáš Novák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Petru Kubíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Burianovi za příležitost zpracovat mou diplomovou práci ve společnosti ŽĎAS a.s. a pánům Petru Bukáčkovi a Ing. Františku Fickovi za odborné rady a postřehy při společných konzultacích.

V neposlední řadě musím poděkovat také paní Denise Marcinkové za zprostředkování odborných konzultací ve společnosti BRANO a.s. a panu Janu Chovancovi za ochotu a čas, kterou mi věnoval během společného setkání.

Největší poděkování patří mé rodině a partnerce, kteří mi byli oporou během celé doby studia.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Systémový přístup k řešení problému.....	12
1.1.1 Analýza problémové situace	12
1.1.2 Formulace problému.....	12
1.1.3 Cíle řešení problému.....	13
1.1.4 Systém podstatných veličin Ω	13
1.1.5 Volba metody řešení	14
1.2 Technologie linky na zpracování plechu.....	16
1.2.1 Popis technologie vstupního úseku.....	16
1.2.2 Popis technologie rozvíječky se zavážecím vozem.....	17
1.2.3 Popis technologie rovnačky	18
1.2.4 Popis technologie zásobní smyčky vstupního úseku	19
1.2.5 Popis technologie podavače a prostoru za výstupním válečkovým skluzem.....	20
1.3 Tenkostěnné těleso.....	21
1.3.1 Tělesa typu stěna, deska, stěnodeska	22
1.3.2 Řešení elementárních typů těles v uzavřeném tvaru.....	25
1.3.3 Rovinný stav deformace.....	27
1.3.4 Rovinný stav napjatosti.....	28
1.3.5 MS pružnosti	29
1.3.6 Residuální napětí	30
1.4 Metoda konečných prvků.....	32
1.4.1 Teoretický základ.....	32
1.4.2 Nelineární úlohy mechaniky v MKP	32
2 Výpočtový model.....	36
2.1 Procesy ovlivňující napjatost v pásu plechu	36
2.2 Vstupní parametry.....	37
2.3 Model materiálu.....	38
2.4 Model geometrie.....	38
2.5 Model okrajových podmínek, vazeb a zatížení	40
3 Výpočet	41
3.1 Výpočet modelu I. úrovně.....	41
3.1.1 Volba typu prvků.....	42
3.1.2 Průběh napětí a deformace po šířce plechu.....	43
3.1.3 Stanovení korekčního součinitele pro různé parametry smyčky.....	46
3.1.4 Průběh napětí a deformace na úzkém plechu	47

3.2	Výpočtový model II. úrovně	49
3.2.1	Zpracování výsledků.....	50
3.2.2	Prezentace výsledků.....	55
3.3	Výpočtový model III. úrovně	58
3.3.1	Zpracování výsledků.....	60
ZÁVĚR		63
BIBLIOGRAFIE.....		65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		67
SEZNAM OBRÁZKŮ		69
SEZNAM TABULEK.....		70

ÚVOD

Diplomová práce je zadána a řešena ve spolupráci s průmyslovým partnerem ŽĎAS, a.s. Jejím hlavním cílem je posouzení napjatostně deformačních stavů pásu plechu v zásobní smyčce o nestandardních rozměrech. Postup při řešení tohoto problému je popsán v následujících odstavcích.

Řešení jakéhokoliv problému vyžaduje především jeho důkladné pochopení. Z toho důvodu je nejprve nutné zjistit, jaké procesy probíhají na pásu plechu během jeho zpracování v lince. Informace k této rešeršní studii jsou čerpány především z interních materiálů společnosti ŽĎAS, a.s a budou v práci uvedeny v takové míře, aby si čtenář dokázal vytvořit dostatečnou představu o řešeném problému a zároveň nebylo prozrazeno know-how firmy.

Vstupní údaje do výpočtu budou poskytnuty na konzultacích u zadavatele. Jedná se především o model geometrie zásobní smyčky, který vychází z dosavadního konstrukčního řešení. Dále zde bude uveden rozsah vstupních parametrů (délka smyčky, požadována zásoba a tloušťka plechu). Tyto parametry se během práce mohou měnit dle požadavků zadavatele.

Následovat bude vytvoření výpočtového modelu, který bude odpovídajícím zjednodušením reality. Všechny kroky vedoucí ke konečné podobě tohoto modelu budou v práci popsány a odůvodněny. Výsledky získané metodou konečných prvků budou konzultovány s vedoucím práce na fakultě a s konzultanty ve společnosti ŽĎAS, a.s.

Výstupní veličiny jako průhyb plechu, maximální zásoba a redukované napětí se zpracují do takové formy, která bude vyhovovat zaměstnancům společnosti. Konkrétní podoba se dohodne během řešení na konzultacích.

V poslední části bude odhadnuto, jakým způsobem může napjatostní stav ovlivnit reziduální napětí vznikající v předchozích výrobních operacích na pásu plechu. Zbytková napjatost totiž s vědomím zadavatele v hlavních cílech zahrnuta není. Výstupem této kapitoly bude navrhnutý koeficient bezpečnosti, který by zaručoval, že nedojde k dosažení mezního stavu pružnosti během reálného provozu.

1 Teoretická část

1.1 Systémový přístup k řešení problému

K problému v této diplomové práci je potřeba přistoupit systémově. Systémový přístup je prvek systémové metodologie.

„Systémový přístup je zobecněná a sofistikovaná tvůrčí metodologie myšlení a konání, aplikovatelná na jakékoli systémové entity. Je tvořena posloupností uvědomělých, popsatelných, realizovatelných, případně i formalizovaných činností, respektujících atributy systémového přístupu, které zahrnují všechny podstatné skutečnosti ve vztahu k entitě [1].“

Jeho podstatou je na řešeném objektu Ω definovat problém. Objekt Ω je obklopen svým okolím, které ho aktivuje a vytváří na něm procesy. Pokud ze všech vlastností objektu Ω a jeho okolí vybereme pouze ty, které jsou zásadní z hlediska řešení problému, dostáváme systém podstatných veličin $\Sigma \Omega$.

1.1.1 Analýza problémové situace

Zásobní smyčka linky pro zpracování plechu slouží k vytvoření dostatečné zásoby pásu před lisem. Díky tomu se zaručí plynulost výrobního procesu a zamezí se vzniku poruchových stavů. V současné době jsou linky společnosti ŽĎAS, a.s. dodávány většinou se smyčkou o délce 5 m. Úkolem řešitele diplomové práce je stanovit napjatost a deformaci pásu plechu pro smyčky o různých délkách a zároveň zjistit maximální možnou zásobu pásu plechu, kdy nedojde k dosažení mezního stavu pružnosti. Výsledky diplomové práce budou využity ve společnosti ŽĎAS, a.s. k návrhu linek o nestandardních rozměrech.

1.1.2 Formulace problému

Úkolem řešitele diplomové práce je vytipovat kritická místa pásu ve smyčce, stanovit hodnoty redukovaného napětí a průhybu pásu v závislosti na požadované zásobě, délce smyčky a tloušťce pásu. Tato data následně zpracuje do výsledkového souboru, který předá společnosti ŽĎAS, a.s. Výsledky diplomové práce budou využity ve společnosti ŽĎAS, a.s. k návrhu linek o nestandardních rozměrech.

1.1.3 Cíle řešení problému

- Popis technologie vstupního úseku.

V této části se čtenář seznámí s technologií, která je použita na linkách pro zpracování plechu. Jedná se především o popis rozvíječky se zavážecím stolem, rovnačky, zásobní smyčky a podavače do lisu. Tyto informace byly získány na konzultacích jednak ve společnosti ŽĐAS, a.s., jednak ve společnosti BRANO a.s., která je odběratelem těchto linek a využívá je při výrobě součástí pro automobilový průmysl.

- Získání vstupních údajů do výpočtu

Zde bude popsán model geometrie zásobní smyčky, který vychází z dosavadního konstrukčního řešení. Dále bude uveden rozsah vstupních parametrů (délka smyčky, zásoba a tloušťka pásu), které byly dohodnuty na konzultacích, a pro které budou výpočty provedeny.

- Deformačně napěťová analýza

Cílem této kapitoly bude vytvoření výpočtového modelu, pomocí kterého budou získány výstupní hodnoty napětí a deformace.

- Zpracování výstupních hodnot do výsledkového souboru

Výsledky budou zpracovány v softwaru MS Excel, aby byly lehce dostupné pro zaměstnance společnosti ŽĐAS, a.s.

- Zvýšení úrovně výpočtového modelu po zahrnutí předchozí plastické deformace

Plech uvažujeme ve výchozím nedeformovaném stavu. Ve skutečnosti je do materiálu po průchodu rovnačkou vnesena zbytková napjatost. Ta bude ve výpočtu vytvořena teplotním namáháním.

1.1.4 Systém podstatných veličin $\Sigma \Omega$.

Řešeným objektem je v tomto případě pás plechu procházející linkou. Pro určení podstatných veličin se vlastnosti objektu a jeho okolí rozdělí do následujících podmnožin.

S0 – prvky okolí objektu.

- Rovnačka
- Podavač plechu do lisu
- Válečkový skluz
- Obsluha linky na zpracování plechu

S1 – struktura, topologie a geometrie objektu

- Tloušťka t a šířka b objektu Ω
- Materiál homogenní, izotropní a lineárně pružný

S2 – vazby mezi objektem a okolím

- Aproximace styku mezi objektem Ω a podavačem lisu, respektive rovnačkou kontaktní vazbou No separation (viz. kapitola 1.4.2).
- Aproximace styku mezi objektem Ω a válečkovým skluzem kontaktní vazbou Frictionless. (viz. kapitola 1.4.2).

S3 – aktivace objektu

- Gravitační zrychlení (počáteční průhyb pásu)
- Deformační zatížení objektu Ω rovnačkou (vytvoření požadované zásoby)

S4 – ovlivnění objektu okolím

- Rychlost posuvu rovnačky
- Kadence lisu

S5 – oborové vlastnosti prvků objektu

- Elastické konstanty materiálu (Youngův modul pružnosti, Poissonův poměr)
- Mez kluzu a mez pevnosti materiálu

S6 – procesy probíhající na objektu

- Změna polohy atomů v krystalové mřížce

S7 – projevy objektu jako následek probíhajících procesů

- Elastická deformace
- Vznik napjatosti
- Změna geometrické konfigurace objektu Ω

S8 – důsledky projevů objektu

- Vytvoření zásoby plechu před lisem

Při řešení problému je tedy zapotřebí zohlednit co možná nejvíce výše zmíněných skutečností. V této diplomové práci se jedná o řešení přímého problému, kdy se pro vstupní veličiny S0 až S5 zjišťují odpovídající výstupy S6 až S8. Všechny veličiny jsou v tomto případě považovány za deterministické a stacionární

1.1.5 Volba metody řešení

Z důvodu velkých deformací objektu a složitosti okrajových podmínek jsou diferenciální metody v tomto případě nepoužitelné. K řešení problému tak bude použit variační přístup, konkrétně metoda konečných prvků. Jelikož se jedná o nelineární statickou úlohu, přichází v úvahu řešení jak implicitní, tak i explicitní formou metody.

U implicitního algoritmu jsou posuvy na konci časového okamžiku (v čase t_{n+1}) závislé na předchozím časovém okamžiku t_n a současně i na aktuálně řešeném časovém okamžiku t_{n+1} . Její nevýhoda spočívá v sestavování matice tuhosti pro každý časový krok, s čímž souvisí nárůst výpočtového času. Metoda je vhodná zejména pro statické a „pomalejší“ dynamické děje s mírnějšími nelinearitami.

Explicitní algoritmus, na rozdíl od implicitního, získává posuvy v čase t_{n+1} pouze pomocí předchozího časového okamžiku t_n . Uvedenou metodou nelze přímo řešit statické děje. Na druhou stranu jsou časové kroky explicitního algoritmu výrazně menší, než u algoritmu implicitního (i o několik řádů). Tato metoda je zejména vhodná pro analýzu velmi rychlých dějů s výrazně nelineárním chováním.

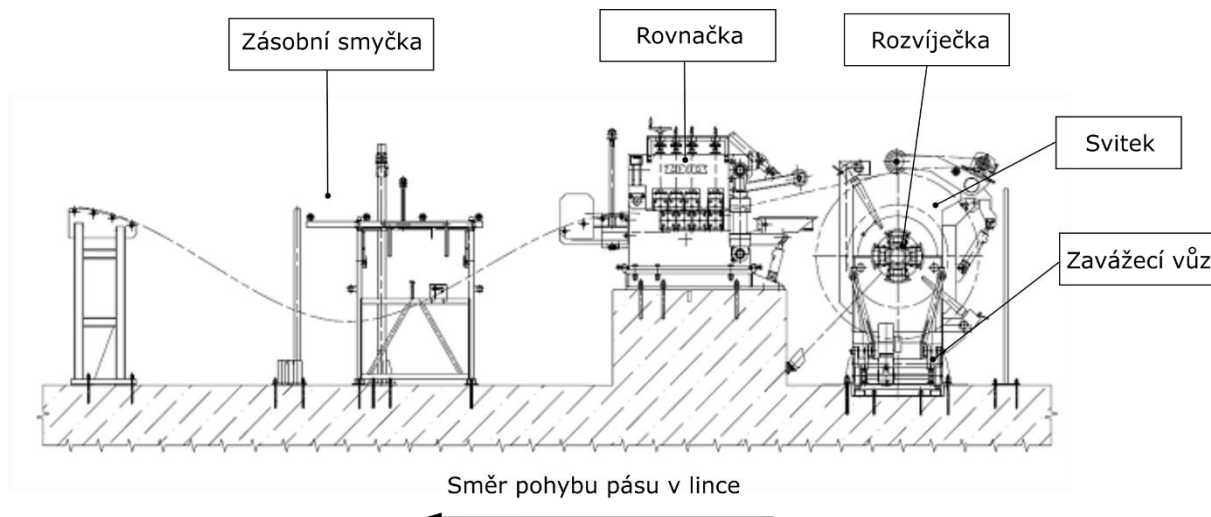
Během studia jsme se ve většině případů setkávali s metodou implicitní. Proto byl tento postup použit i na řešení problému v této diplomové práci. Jako výpočtový software byl zvolen ANSYS Workbench verze 19 R3. Při řešení problému jako 3D úlohy byly zvoleny skořepinové prvky SHELL 281. Ty vhodně popisují napětí po tloušťce za pomoci konstitutivních vztahů.

Pro 2D analýzy byly použity kvadratické rovinné prvky PLANE 183. Zde bylo zapotřebí dodržet minimálně 5 prvků po tloušťce, aby výpočtový model správně vystihl průběh napětí po tloušťce plechu.

1.2 Technologie linky na zpracování plechu

1.2.1 Popis technologie vstupního úseku

Diplomová práce je zaměřena především na vstupní úsek celé linky. Proto je zde popsána pouze technologie před lisem. Hlavní funkcí je zavést svitek plechu o daných parametrech na trn rozvíječky, rozvinout a přes rovnačku a prostor zásobní smyčky zavést do podavače lisu [2]. Schematický náčrt tohoto úseku je na Obr. 1.



Obr. 1 Dispozice vstupního úseku [2]

Zavádění plechu do linky

Svitek plechu je jeřábem položen na stůl zavázejícího vozu, pomocí kterého je zavezen a usazen na trn rozvíječky. Po spuštění přitlačné kladky na svitek může obsluha linky přestříhnout vázací pásy. Trn se svitkem a přitlačnou kladkou se roztočí a začátek pásu je odhýbačem odehnut od svitku a začne se plynule odvíjet. Za plynulého odvíjení svitku se začátek pásu posouvá po stole až do doby, než je zaveden do rovnačky. V momentě, kdy začátek pásu projde za dolní podávací válec, je odvíjení zastaveno. Dojde k jeho vystředění do osy linky a následnému sevření rovnačkou. Vytvoří se tah mezi rovnačkou a rozvíječkou a může být zvednuta přitlačná kladka. Po zvednutí převáděcího stole je začátek pásu zaveden přes prostor zásobní smyčky do podavače lisu. Po sklopení převáděcího stole, rozvinutí a vyrovnání dané délky pásu je vytvořena zásobní smyčka a linka je připravena na přechod do automatického režimu.

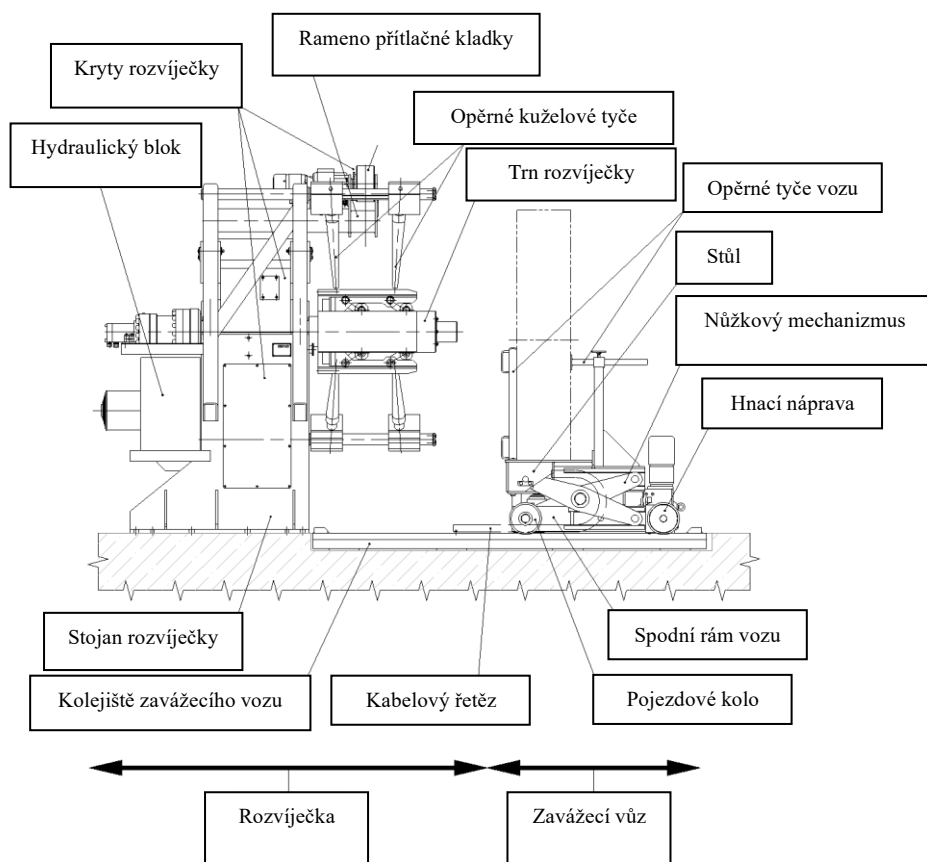
Automatický režim

V automatickém chodu dochází k plynulému odvíjení pásu z rozvíječky, jeho následnému rovnání a doplňování zásobní smyčky. Podavač odebírá pás ze smyčky krokově dle předem zvolené kadence lisu, která určuje rychlost a délku podání pásu. Ve smyčce by tak vždy měla být dostatečná zásoba, aby nedošlo k přetržení pásu plechu nebo případné poruše zařízení linky.

Po průchodu konce svitku rovnačkou se vypne automatický režim a konec pásu je zpracován za dohledu obsluhy. Posléze je na trn rozvíječky nasazen nový svitek a celý postup se opakuje.

1.2.2 Popis technologie rozvíječky se zavážecím vozem

V této podkapitole bude důkladněji popsáno zařízení začátku linky na zpracování plechu popsané na Obr. 2 [2].



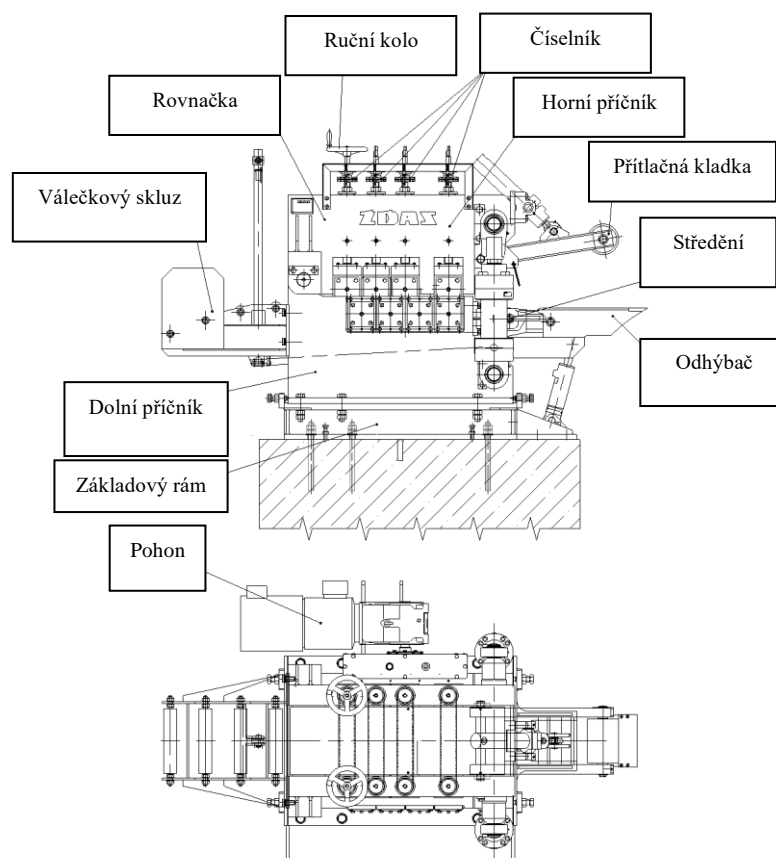
Obr. 2 Popis zařízení – rozvíječka + zavážecí vůz [2]

Svitek je nejprve jeřábem položen na stůl zavážecího vozu, na němž ho ve svislé poloze drží opěrné tyče. Elektrickým pohonem hnací nápravy je zajištěn posuv vozu v podélném směru. Zvedání stolu se svitkem zajišťuje pomocí nůžkového mechanismu hydraulický válec. Pohyb vozu a stolu je řízen obsluhou z ovládacího pultu.

Zavážecím vozem je svitek nasunut na trn rozvíječky. Jeho poloha je zajištěna rozevřením trnu a přisunutím opěrných kuželů. Následně se sklopí rameno přitlačné kladky a obsluha může přestříhnout vázací pásy. Zvedání ramena přitlačné kladky provádí hydraulický válec. Po roztočení svitku je začátek pásu odhýbačem odehnut a zaveden do podávacích válců rovnačky.

1.2.3 Popis technologie rovnačky

V této podkapitole bude důkladněji popsána funkce a konstrukce rovnačky RS 3-8x300/6, která je na Obr. 3 [2].



Obr. 3 Popis zařízení – rovnačka [2]

Horní a dolní příčník

Rovnačka RS 3–8 x 300/6 má 6 rovnacích a 2 podávací válce. K hlavním částem patří dolní příčník, ke kterému jsou připevněny dolní rovnací válce a dolní podávací válec. Součástí dolního příčníku je rovněž pohon válců. V horním příčníku jsou uloženy horní rovnací válce a horní podávací válec. Svíráni rovnacích válců je prováděno dvojicí hydraulických válců.

Přítlačná kladka

Přítlačná kladka slouží k prolomení začátku pásu po odehnutí ze svitku. Její pohyb je vyvozen hydraulickým válcem uchyceným na horním rámu rovnačky.

Odhýbač

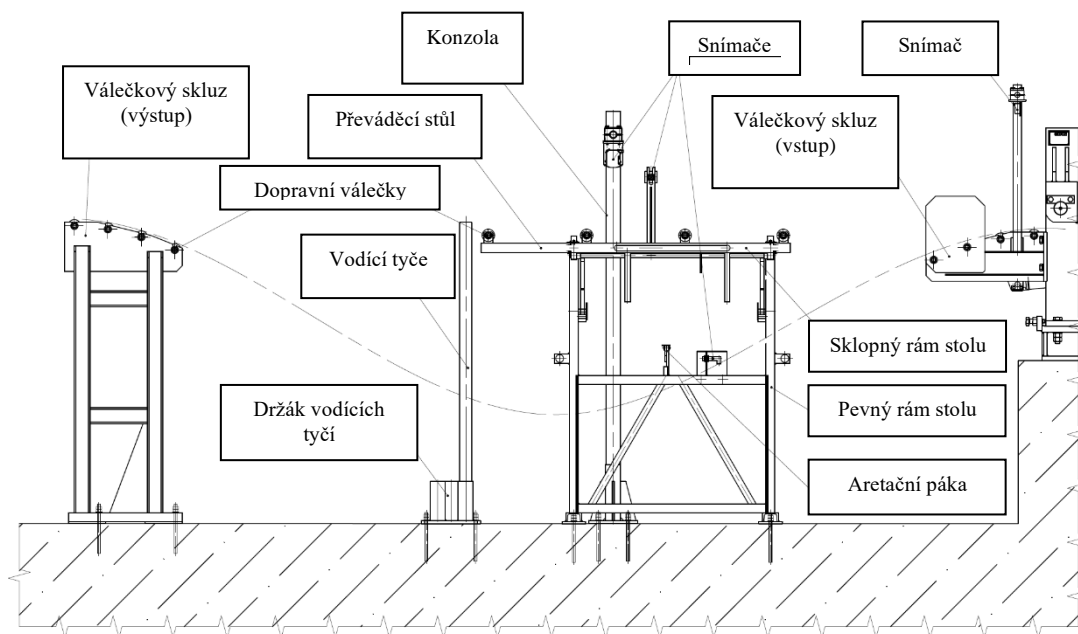
Odhýbač je rovněž uchycen na čepovém spojení k dolnímu příčníku rovnačky. Je uzpůsoben k odehnutí začátku pásu od svitku. Jeho pohyb je vyvozen hydraulickým válcem.

Středění

Středění je umístěno mezi odhýbačem a rovnačkou. Slouží k vystředění pásu do osy linky před jeho zavedením do rovnačky. Svírání středících kladek je prováděno ručně.

1.2.4 Popis technologie zásobní smyčky vstupního úseku

Numerický výpočet za účelem stanovení napjatosti je prováděn pouze na úseku zásobní smyčky. V této podkapitole bude tato část linky popsána důkladněji. Schématický náčrt tohoto úseku je na Obr. 4 [2].



Obr. 4 Popis zařízení – zásobní smyčka [2]

Převáděcí stůl

Převáděcí stůl slouží k převedení začátku pásu plechu přes prostor zásobní smyčky do podavače lisu. Jedná se o svařovaný pevný rám nacházející se uprostřed zásobní smyčky. K pevnému rámu je kyvně připevněn sklopný rám, na kterém jsou umístěny čtyři dopravní válečky. Sklopný rám je v horní poloze držen dvěma podpěrnými tyčemi. Jejich délku lze nastavit stavěcími šrouby. Ve spodní poloze je stůl držen aretační pákou. Sklápění horního stolu se vykonává ručně.

Konzola

Konzola slouží k umístění laserového snímače, který hlídá velikost průhybu pásu ve smyčce. Plech by se nikdy neměl dostat do stavu úplného natažení (tzn. nulová zásoba pásu ve smyčce) a naopak by také nemělo dojít ke kontaktu pásu se zemí. Konzola je svařovaná konstrukce z trubky a plechu s otočným a výškově nastavitelným horním ramenem.

Snímače

Linku na zpracování plechu hlídá dohromady téměř 20 snímačů. Jedná se především o snímače indukční, dále laserové, optické, teplotní, tlakové atd. Jejich úkolem je podávat informace o polohách, ve kterých se nacházejí pohyblivé části jednotlivých zařízení. Některé snímače měří velikost průhybu pásu v zásobní smyčce nebo měří tlak a teplotu oleje v hydraulickém systému atd. Na základě informací od jednotlivých snímačů jsou pomocí řídicího systému

ovládány pohyby dalších částí. Některé snímače mají také bezpečnostní funkci. Pokud snímače nezaznamenají podmínky, které jsou zadány v řídicím systému, dojde k zastavení linky a nahlášení poruchy.

Válečkové skluzy

Válečkové skluzy jsou situovány na začátku a na konci zásobní smyčky. Slouží jako podpora pásu při jeho náběhu a výběhu ze smyčky. Jejich geometrie je navržena tak, aby zabránila prolomení pásu plechu a zároveň usnadnila jeho posuv z rovnačky a do podavače lisu.

Válečkový skluz za rovnačkou (vstupní skluz) se skládá ze svařovaného rámu připevněného k rovnačce. Horní část vstupního skluzu je osazena čtyřmi dopravními válečky, které lze demontovat povolením matic na hřídeli.

Válečkový skluz před lisem (výstupní skluz) se skládá ze svařovaného rámu ukotveného do podlahy těsně před lisem. Horní část výstupního skluzu je také osazena čtyřmi demontovatelnými dopravními válečky.

Vodící tyče

Vodící tyče slouží k bočnímu vedení pásu plechu v zásobní smyčce. Jejich použití zaručí, že pás plechu při rozkmitání kolmo na osu dopravy nevyběhne z dosahu snímačů pro kontrolu hloubky smyčky. Obě vodící tyče se zasunují do otvoru držáku podle šířky momentálně odvíjeného plechu. Při šířkách plechu větších než 140 mm nejsou vodící tyče zapotřebí.

1.2.5 Popis technologie podavače a prostoru za výstupním válečkovým skluzem

Podavač zaručuje přesné podávání pásu plechu ze zásobní smyčky do nástroje v lisu. Technologie podávacího zařízení a samotného lisu není zobrazena na Obr. 1. Je to z toho důvodu, že tuto část linky si řeší každý koncový zákazník sám. V této diplomové práci není předmětem řešení samotný lis nebo podávací zařízení. Přesto bylo důležité zjistit, jak se pás plechu deformuje v místě před podavačem. Proto jsem si domluvil konzultace ve firmě BRANO a.s. a měl možnost vidět celou linku v reálném provozu.

Při návštěvě jsem se setkal se dvěma řešeními. V prvním případě byla v místě před podavačem vytvořena plechová šterbina o délce 800 mm a výšce 35 mm. Druhá varianta využívala přítlačný válec, který omezoval vertikální deformaci plechu do výšky stejné jako v případě prvním (35 mm). Ve výpočtu jsem se rozhodl pro variantu s přítlačným válcem o poloměru 50 mm ve vzdálenosti 35 mm od válečkového skluzu a 800 mm od podavače Obr. 22.

1.3 Tenkostěnné těleso

Tenkostěnné těleso je takovým typem tělesa, které splňuje předpoklady tenkostěnnosti. Splnění těchto předpokladů vyžaduje, aby tloušťka byla v každém bodě výrazně menší než zbývající dva rozměry.

$$l, b \gg t \quad (1)$$

Dle [3] členíme předpoklady tenkostěnného tělesa na:

1) předpoklady geometrické

Tenkostěnné těleso je určeno střednicovou plochou Γ a v každém jeho bodě tloušťkou t na normále plochy Γ . Tloušťka t je přitom rozdělena souměrně vzhledem k Γ . Střednicová plocha je spojitá, hladká a má konečné rozměry.

2) předpoklady vazbové

Vazby omezují pouze posuvy a natočení bodů, nacházejících se na střednicové ploše.

3) předpoklady zatěžovací

Těleso je zatěžováno vnějšími silami pouze v bodech jeho střednicové plochy

4) předpoklady deformační

Střednicová plocha zůstává i po deformaci spojitá a hladká. Normálové řezy zůstávají i po deformaci rovinné.

5) předpoklady napjatostní

Napjatost tenkostěnného tělesa je určena normálovými a smykovými napětími ve dvou vzájemně kolmých normálových řezech. Normálová napětí ve střednicových řezech se zanedbávají.

Tenkostěnná tělesa rozdělujeme dle:

- charakteru zakřivení střednicové plochy ve výchozím a deformovaném stavu
- charakteru rozložení napětí v normálových řezech

Podle těchto kritérií rozlišujeme tělesa typu:

Typ tenkostěnného tělesa		Průběh napětí	Typ napjatosti	Tvar střed. plochy
Skořepina	membránová	rovnoměrný	membránová	obecná zakřivená plocha
	momentová	lineární na Γ nulové	momentová	
	obecná	lineární na Γ nenulové	obecná rovinná	
Stěna		rovnoměrný	membránová	rovinná oblast
Deska		lineární na Γ nulové	momentová	
Stěnodeska		lineární na Γ nenulové	obecná rovinná	

Tab. 1 Typy tenkostěnných těles [3]

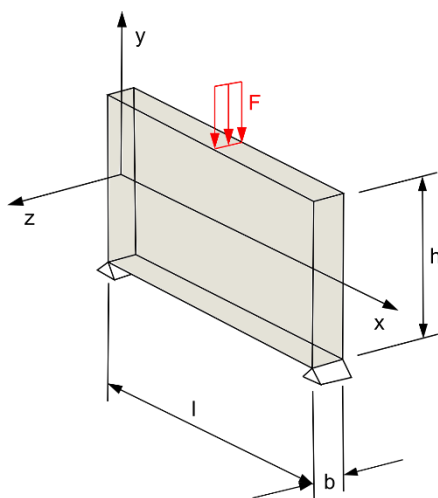
Pás plechu, který je předmětem řešení v této diplomové práci, lze téměř pro všechny kombinace šířky a tloušťky považovat za tenkostěnné těleso s rovinnou střednicovou plochou.

V tomto konkrétním případě je navíc plech zatížen jednak v rovině střednicové plochy (deformačně posuvem od rovnačky), jednak kolmo na střednicovou plochu (silově vlastní tíhou). Dle [3] se jedná o těleso typu stěnodeska s lineárním průběhem napětí po tloušťce t a s nenulovou hodnotou na střednicové ploše Γ . Těleso vykazuje obecnou rovinnou napjatost.

1.3.1 Tělesa typu stěna, deska, stěnodeska

Stěna

Pokud se v řešeném případě jedná o těleso typu stěna, které je zatíženo pouze v rovině střednicové plochy Γ , pak v tělese působí složky napětí $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$



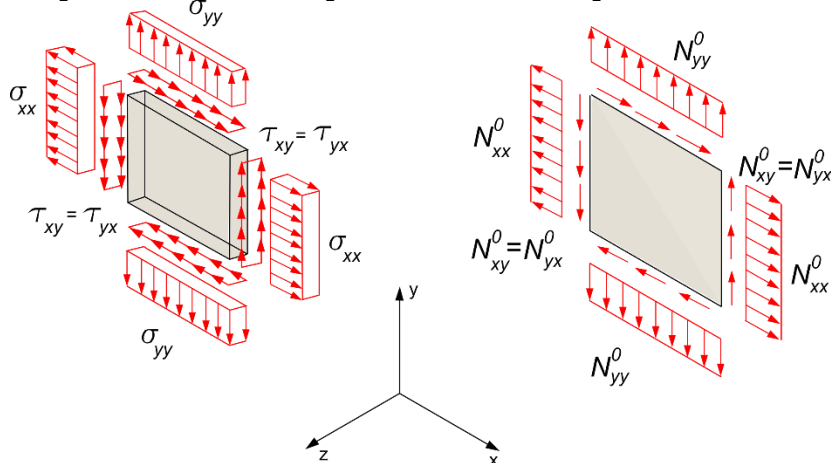
Obr. 5 Těleso typu stěna [4]

Hodnoty napětí $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ nejsou závislé na tloušťce stěny [4], tudíž platí:

$$\sigma_{xx} = f(x, y), \sigma_{yy} = f(x, y), \tau_{xy} = f(x, y). \quad (2)$$

Hodnoty napětí je možné vyjádřit ve formě liniových silových toků, které působí pouze v rovině střednicové plochy a jsou definovány rovnicemi:

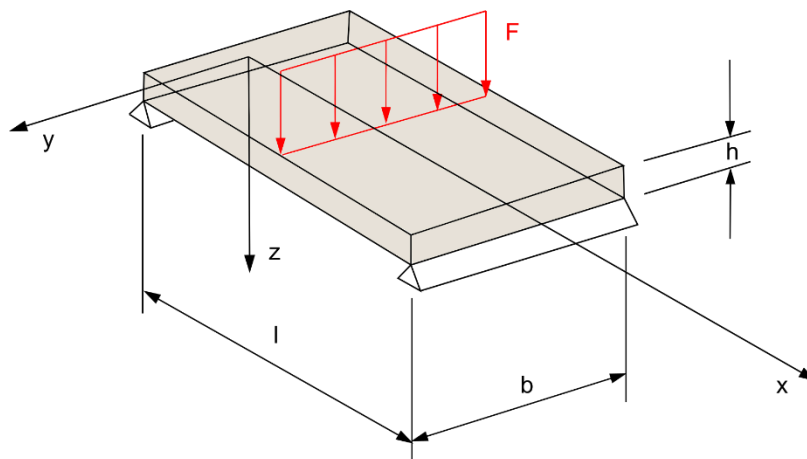
$$N_{xx} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_{xx} dz \quad N_{yy} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_{yy} dz \quad N_{xy} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \tau_{xy} dz. \quad (3)$$



Obr. 6 Napětí působící na tělesu typu stěna (vlevo) a liniové silové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]

Deska

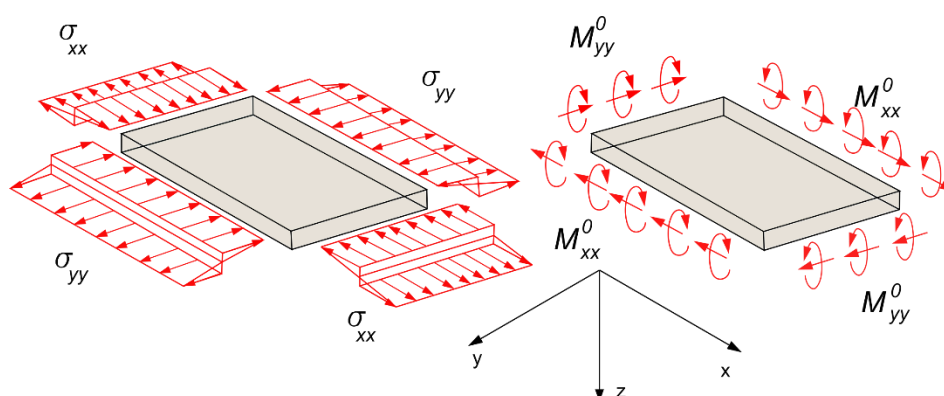
Těleso typu deska je naopak zatíženo pouze ve směru kolmém na střednicovou plochu Γ . Kromě složek napětí $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ budou v tělesu působit také smyková napětí τ_{xz}, τ_{yz} . [4]



Obr. 7 Těleso typu deska [4]

Obdobně jako u stěny je možné napěťové veličiny vyjádřit ve formě liniových momentových toků, které lze formulovat jako:

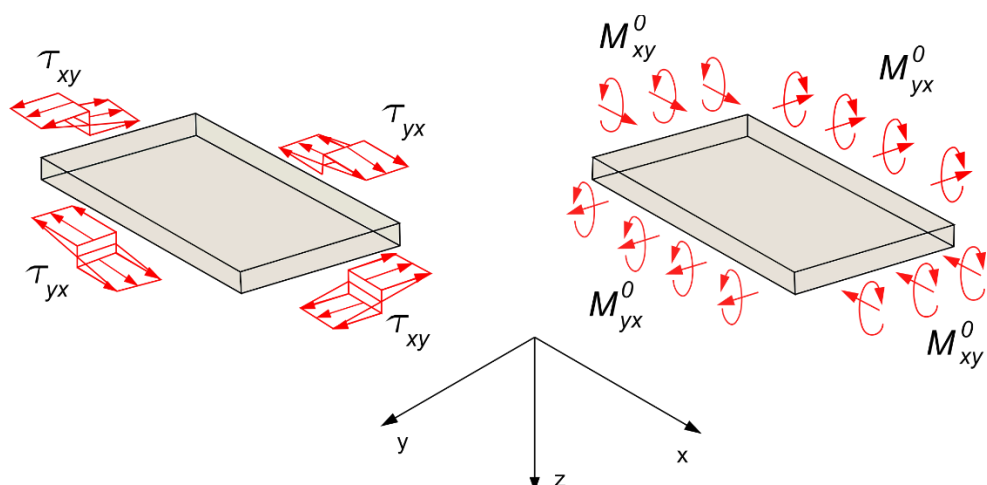
$$M_{xx} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_{xx} z dz \quad M_{yy} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_{yy} z dz. \quad (4)$$



Obr. 8 Normálové napětí působící na těleso typu deska (vlevo) a liniové momentové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]

Kromě normálových napětí způsobují momenty také zatížení na krut a s tím související smyková napětí. Jejich liniové momentové toky lze vyjádřit jako:

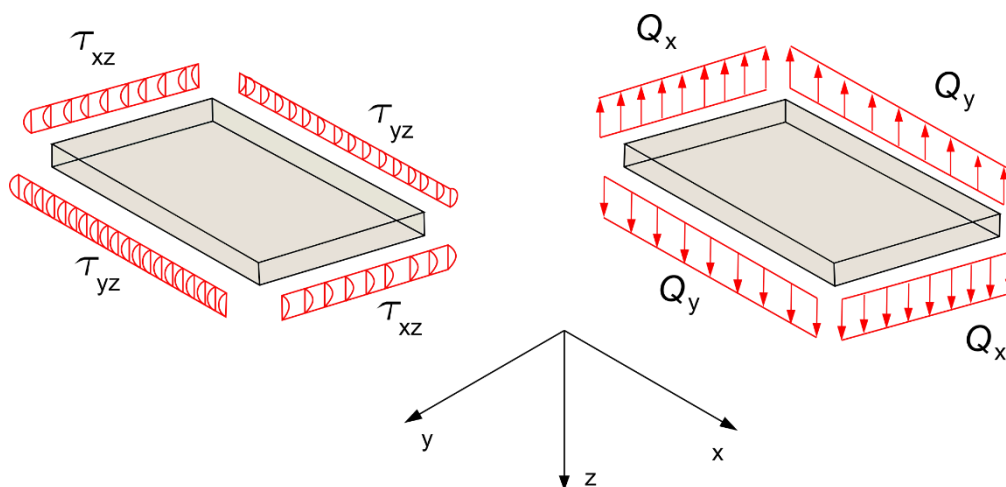
$$M_{xy} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \tau_{xy} z dz. \quad (5)$$



Obr. 9 Smykové napětí působící na těleso typu deska (vlevo) a liniové momentové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]

Posledním silovým účinkem u tohoto tělesa je posouvající síla. Její vliv se ve většině případů zanedbává. Její silové toky lze vyjádřit podle vztahu:

$$Q_x = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \tau_{xz} dz \quad Q_y = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \tau_{yz} dz. \quad (6)$$



Obr. 10 Smykové napětí působící na těleso typu deska (vlevo) a liniové silové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]

Značení jednotlivých liniových toků velkými písmeny je převzato ze zahraniční literatury [4]. Ekvivalentní označení podle české literatury (např: [5]) by bylo:

$$\begin{aligned} N_{xx} &= q_x \\ M_{xx} &= m_x \\ Q_x &= q_{xz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{yy} &= q_y \\ M_{yy} &= m_y \\ Q_y &= q_{yz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{xy} &= q_{xy} \\ M_{xy} &= m_{xy} \end{aligned}$$

Stěnodeska

Těleso typu stěnodeska může být zatíženo jak membránovým, tak i momentovým zatížením. Výsledná napjatost v tělese je pak obecná rovinná. Průběh normálových napětí σ_{xx} , σ_{yy} je po tloušťce lineární s nenulovou hodnotou na střednicové ploše.

1.3.2 Řešení elementárních typů těles v uzavřeném tvaru

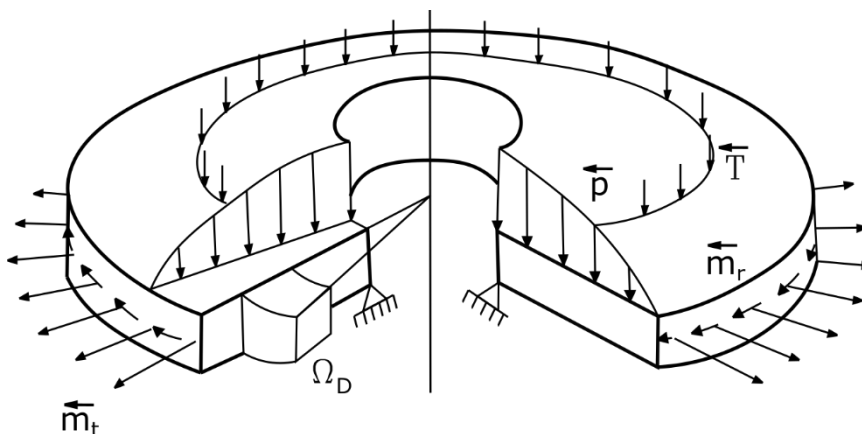
Pro těleso obecného tvaru a zatížení takového řešení zpravidla neexistuje. V rámci PPII jsme se setkali s tzv. elementárními tělesy, pro které je možné řešení v uzavřeném tvaru nalézt. Z těles popsanych v kapitole 1.3.1 zde patří:

- Rotující kruhová a mezikruhová stěna
- Kruhová a mezikruhová deska

V této kapitole bude uvedeno analytické řešení pro těleso typu deska.

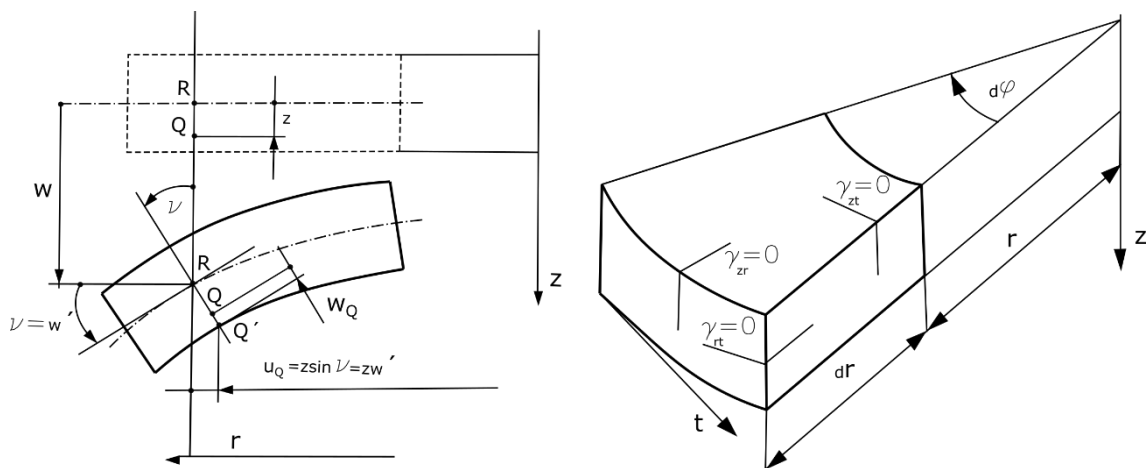
Kruhová a mezikruhová deska

Mezikruhová deska zobrazena na Obr. 11 je zatížena spojitým měrným tlakem p , radiálními a obvodovými silovými dvojicemi působícími na obvodech desky nebo na soustředných kružnicích a liniovými silami působícími na soustředných kružnicích [3]. Typickým elementárním prvkem je prvek Ω_D , který je dán dvěma válcovými a dvěma meridiánovými řezy.



Obr. 11 Zatížení mezikruhové desky [3]

Deformace elementárního prvku musí respektovat rotační symetrii tělesa. To znamená, že body na meridiánovém řezu zůstávají ve stejné rovině i po deformaci. Významnou složkou deformace je průhyb desky w kolmo na rovinu střednicové plochy. V takovém případě se válcové řezy mění na řezy kuželové. Příčný průřez zůstává kolmý na střednicovou rovinu, tzn., že úhlová přetvoření $\gamma_{zt}, \gamma_{rt}, \gamma_{zr}$ zůstávají nulová a nenulová délková přetvoření $\varepsilon_r, \varepsilon_t, \varepsilon_z$ jsou zároveň hlavními přetvořeními.



Obr. 12 Deformace elementárního prvku [3]

Po uvolnění elementárního prvku, sestavení silové rovnice rovnováhy v osové směru, momentové rovnice rovnováhy v tečném směru a zanedbání diferenciálu druhého řádu získáme rovnice rovnováhy v tvaru:

$$\frac{dT}{dr} + \frac{T}{r} + p(r) = 0, \quad (7)$$

$$m_r - m_t + r \frac{dm_r}{dr} = rT, \quad (8)$$

kde obdobně jako u rovnice (4) je možné využít rovnic statické ekvivalence a psát:

$$m_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; \quad m_t = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_t z dz. \quad (9)$$

K řešení je dále zapotřebí definovat geometrické vztahy podle Obr. 12 (vlevo) jako:

$$u = -z \sin(v) = -zv = -z \frac{dw}{dr}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_t = -z \frac{dv}{dr}; \quad \varepsilon_r = -z \frac{v}{r}, \quad (11)$$

a konstitutivní vztahy jako:

$$\sigma_r = \frac{1}{1 - \mu^2} (\varepsilon_r + \mu \varepsilon_t); \quad \sigma_t = \frac{1}{1 - \mu^2} (\varepsilon_t + \mu \varepsilon_r). \quad (12)$$

Nyní jsou k dispozici všechny potřebné rovnice obecné pružnosti pro řešení této úlohy. Po dosazení geometrických rovnic do konstitutivních vztahů a dále konstitutivních vztahů do rovnic statické ekvivalence se získají rovnice liniových silových dvojic ve tvaru:

$$m_r = -B \left(\frac{dv}{dr} + \mu \frac{v}{r} \right); \quad m_t = -B \left(\frac{v}{r} + \mu \frac{dv}{dr} \right), \quad (13)$$

kde B je ohybová tuhost desky, která je závislá především na její tloušťce a je daná vztahem:

$$B = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)}. \quad (14)$$

Dosazením vztahů (13) do momentové rovnice rovnováhy (8) se získá nehomogenní diferenciální rovnice druhého řádu pro řešení v úhlech natočení ve tvaru:

$$\frac{dv^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv}{dr} - \frac{1}{r^2} v = -\frac{T(r)}{B} \quad (15)$$

Pro řešení je vhodné využít tvar:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rv) \right] = -\frac{T(r)}{B} \quad (16)$$

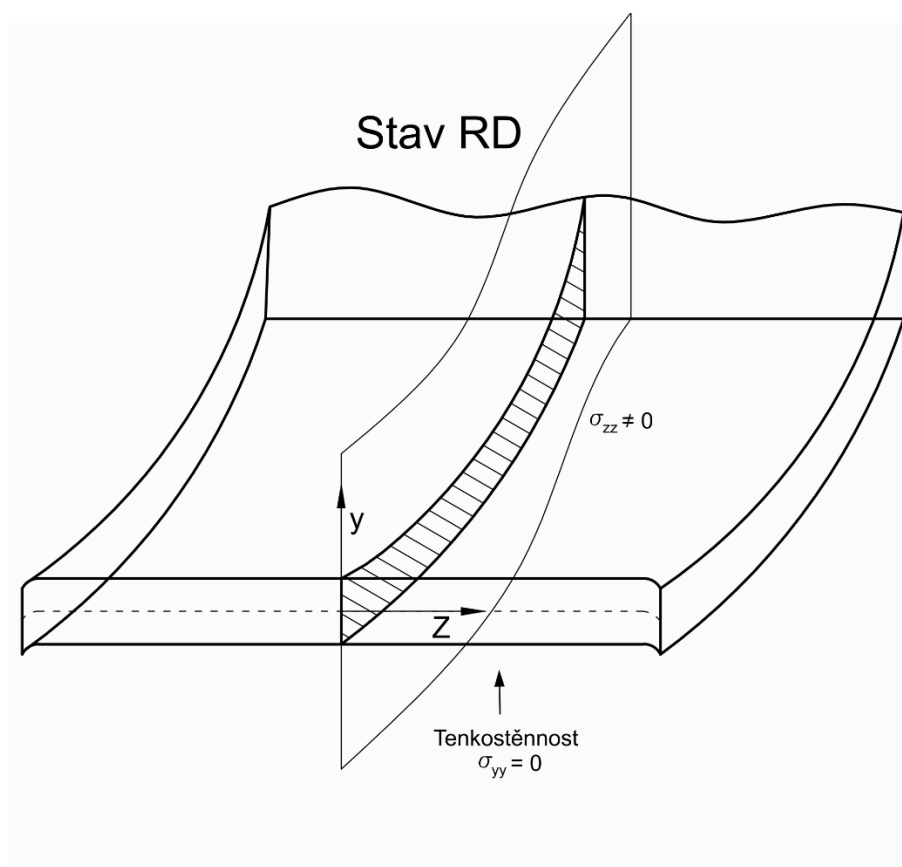
a postupnou integrací získat obecný integrál:

$$v(r) = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \left\{ -\frac{1}{rB} \int \left[r \int T(r) dr \right] dr \right\} \quad (17)$$

Pro získání řešení v posuvech w je nutné rovnici (17) integrovat. Pro jednoznačné řešení je zapotřebí určit integrační konstanty z okrajových podmínek konkrétní úlohy. Zpětným dosazením hodnot natočení do konstitutivních vztahů se získají hodnoty napětí v jednotlivých bodech tělesa.

1.3.3 Rovinný stav deformace

Rovinný stav deformace (dále RD) vykazují tělesa s dostatečně velkým rozměrem v pozorovaném směru. V takovém případě nedochází k deformaci ve směru tohoto rozměru. Náporný příklad stavu RD je možné vidět na Obr. 13. Uprostřed plechu došlo k zamezení deformace ve směru osy z , což má za následek vznik normálového napětí σ_{zz} .



Obr. 13 Stav rovinné deformace uprostřed plechu

$$\varepsilon_{zz} = 0, \gamma_{xz} = 0, \gamma_{yz} = 0 \quad (18)$$

Po dosazení do obecného Hookova zákona se získá vztah pro napětí σ_{zz} .

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\mu}{E}\sigma_{xx} - \frac{\mu}{E}\sigma_{yy} + \frac{1}{E}\sigma_{zz} = 0 \quad (19)$$

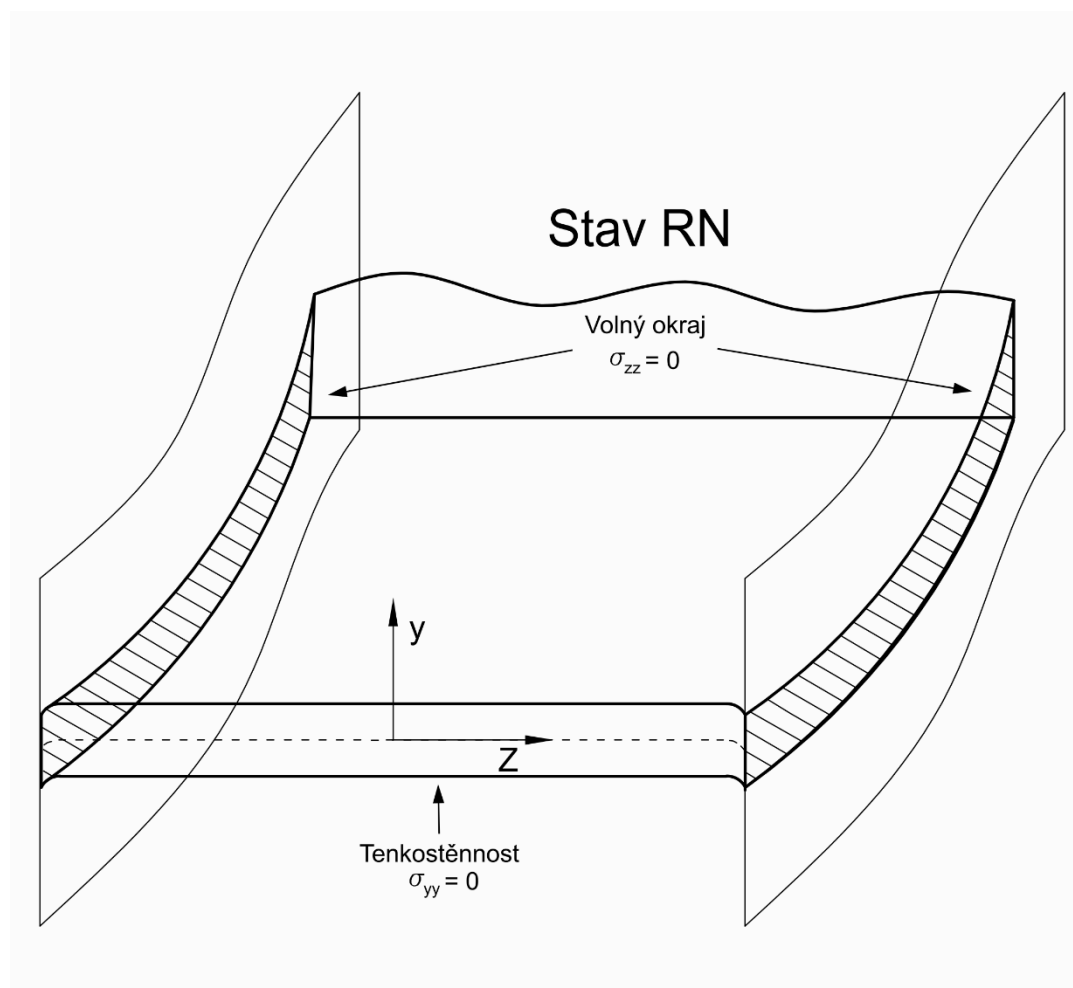
$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (20)$$

Jelikož pás plechu je možné považovat za tenkostěnné těleso, kde $t \ll L, b$, je možné považovat napětí $\sigma_{yy} \cong 0$. Výsledný vztah je pak možné psát ve tvaru:

$$\sigma_{zz} = \mu\sigma_{xx} \quad (21)$$

1.3.4 Rovinný stav napjatosti

Rovinný stav napjatosti (dále RN) je na každém nezatíženém povrchu tělesa. Může se vyskytovat také u tělesa, jehož rozměr v pozorovaném směru je daleko menší než rozměry zbývajících. Příklad takového tělesa je na Obr. 14.



Obr. 14 Stav rovinné napjatosti na volných okrajích

$$\sigma_{zz} = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0 \quad (22)$$

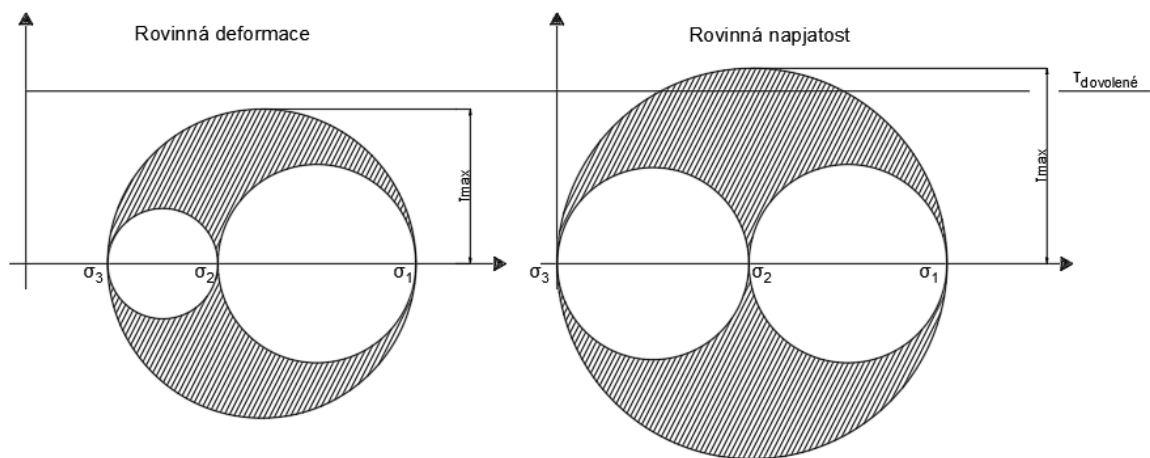
Po dosazení do obecného Hookova zákona dostáváme vztah pro přetvoření ε_{zz} .

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\mu}{E}\sigma_{xx} - \frac{\mu}{E}\sigma_{yy} \quad (23)$$

Z důvodu tenkostěnnosti plechu je výsledný vztah:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\mu}{E}\sigma_{xx} \quad (24)$$

Vhodné je oba typy napjatosti znázornit v Mohrově kružnici. Z Obr. 15 je zřejmé, že při stavu RN dochází k plastické deformaci dříve než za stavu RD.



Obr. 15 Porovnání stavů RN a RD v Mohrově rovině

Tento výrok je v platnosti, pokud všechna tři normálová napětí při stavu RD mají totožné znaménko a σ_1, σ_2 jsou v obou případech stejně velké.

1.3.5 MS pružnosti

„MS pružnosti tělesa – je takový jeho stav, při jehož dosažení vzniknou v bodě tělesa první plastické (tedy trvalé – nevratné) deformace, jejichž velikost je stanovena smluvně [6].“

Pro popis MS pružnosti při obecné napjatosti byla v rámci studia Pružnosti a pevnosti přijata následující omezení:

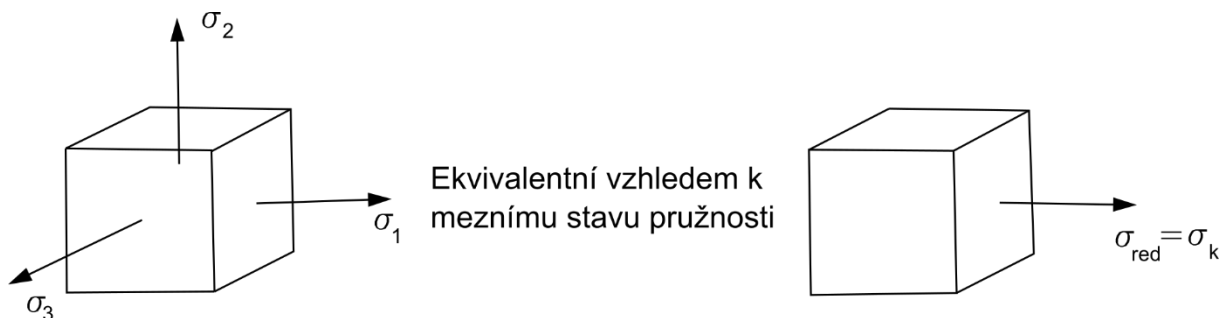
- Monotónně rostoucí zatížení
- Izotropní materiál
- Jednparametrický mezní stav, tzn., že jedinou materiálovou charakteristikou, která ho popisuje, je mez kluzu.

Prostá bezpečnost je vyjádřena vztahem:

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red}},$$

kde σ_k je materiálová charakteristika mez kluzu a σ_{red} je redukované napětí,

„Redukované napětí je hodnota napětí fiktivní tahové napjatosti, přiřazené napjatosti prostorové tak, že prostá bezpečnost je vzhledem k mezi kluzu stejná pro prostorovou i pro fiktivní tahovou napjatost [7].“



Obr. 16 Zobrazení fiktivní tahové napjatosti na elementární krychli [7]

Podmínka plasticity max τ (Trescova podmínka)

Podle této podmínky plasticity nastane MS pružnosti při monotónním zatížení materiálu ve strukturovaném stavu, pokud maximální smykové napětí dosáhne mezní hodnoty τ_{MK} , která je materiálovou charakteristikou [8]. Řezem ρ_k je řez, ve němž působí maximální smykové napětí. Redukované napětí podle Trescovy podmínky je dáno vztahem:

$$\sigma_{red}^{max\tau} = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (25)$$

kde σ_1 je maximální hlavní napětí a σ_3 je minimální hlavní napětí.

V Haighově prostoru je podmínka znázorněna povrchem šestibokého hranolu s osou $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Křivkou plasticity v oktaedrické rovině je pravidelný šestiúhelník.

Podmínka plasticity HMM (von Misesova podmínka)

Podle podmínky HMM nastane MS pružnosti při monotónním zatížení materiálu ve strukturovaném stavu, pokud napětí v oktaedrické rovině dosáhne mezní hodnoty τ_{OK} , která je materiálovou charakteristikou [9; 10; 11]. Redukované napětí je určeno rovnicí:

$$\sigma_{red}^{HMH} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}, \quad (26)$$

kde σ_2 je střední hlavní napětí.

V Haighově prostoru je podmínka znázorněna válcovou plochou s osou $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Křivkou plasticity v oktaedrické rovině je kružnice.

Kvalitativně je možné obě podmínky považovat za správně, kvantitativně se liší maximálně o 15,5 %. Experimentální výsledky nejčastěji spadají do oblasti mezi max τ a HMM.

1.3.6 Residuální napětí

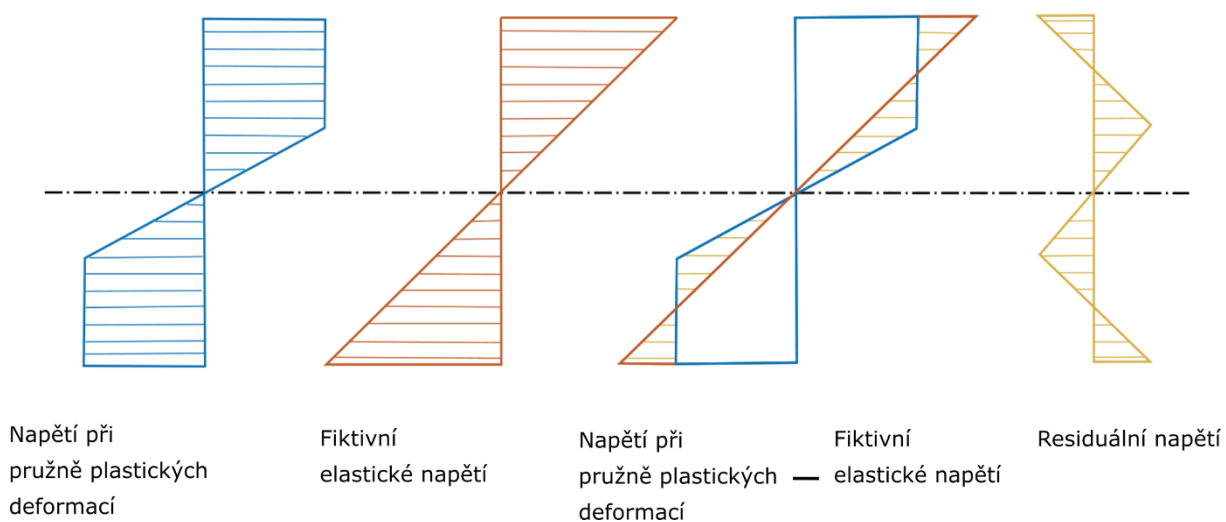
Po ohybovém namáhání, při kterém byla překročena mez kluzu, dojde k plastifikaci vnějších vláken materiálu [12]. Po následném odlehčení zůstávají v průřezu trvalé deformace

bráníci materiálu zaujmout původní rovinný tvar. Takovému stavu odpovídají tzv. zbytková napětí, která je možné vyjádřit dle vztahu:

$$\sigma_R = \sigma_{PP} - \sigma_{fE}, \quad (27)$$

kde σ_R , σ_{PP} , σ_{fE} je napětí residuální, napětí při pružně plastických deformacích a fiktivní elastické.

Fiktivní elastické napětí by vzniklo za předpokladu pouze elastického chování materiálu při zatížení stejnou silovou dvojicí jako v případě pružně plastického chování materiálu. Vztah (27) je názorně vysvětlen na Obr. 17



Obr. 17 Residuální napětí

V našem případě je možné tento průběh očekávat po rozvinutí plechu ze svitku, takže v místě ještě před rovnačkou.

1.4 Metoda konečných prvků

1.4.1 Teoretický základ

MKP je z hlediska matematické formulace metodou variační. Takovýto přístup hledá řešení jako stav, při kterém energie analyzovaného tělesa dosahuje stacionární hodnoty [13]. Ve spojitosti s MKP se nejčastěji hovoří o její deformační variantě, jejímž základem je Langrangeův variační princip, který lze formulovat následovně.

„Mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udělají celkové potenciální energii Π stacionární hodnotu [13].“

Matematicky lze tento vztah zapsat jako:

$$\Pi = W - P, \quad (28)$$

kde W představuje energii napjatosti tělesa a P potenciál vnějších sil.

Celková potenciální energie Π je závislá na funkcích posuvů u, v, w . V MKP je potřeba každou z funkcí vyjádřit v závislosti na konečném počtu parametrů. Posuvy nahradíme předem danými známými funkcemi $N_i(x, y, z)$, $N_j(x, y, z)$, $N_k(x, y, z)$, které se nazývají báze funkce s většinou lineárním nebo kvadratickým průběhem. Báze funkce jsou následně násobeny neznámými složkami u_i, v_j, w_k , které představují posuvy v uzlech dané sítě.

Neznámé posuvy se přiřadí do matice deformačních parametrů U , která se dosadí do rovnice (28). Dle variačního principu se hledá stacionární hodnota funkcionálu Π , což vyjadřuje podmínka (29).

$$\frac{\partial \Pi}{\partial U} = 0 \quad (29)$$

Z této podmínky vychází základní rovnice MKP:

$$KU = F, \quad (30)$$

kde K je celková matice tuhosti a F je celková matice zatížení.

Aby soustava rovnic u statické úlohy byla řešitelná, je nutné předepsat tolik okrajových podmínek, aby bylo omezeno pohybu tělesa jako celku.

1.4.2 Nelineární úlohy mechaniky v MKP

Ve většině skutečných inženýrských problémů je třeba počítat s nelineárním chováním řešeného objektu. Celková matice tuhosti K je oproti lineárnímu řešení závislá na okamžité deformaci tělesa [14].

$$K(u)U = F \quad (31)$$

V MKP rozlišujeme především 3 typy nelinearity:

- **Geometrická nelinearita**
- **Kontakty**
- **Materiálová nelinearita**

Pro výpočet zásobní smyčky je podstatná geometrická nelinearita a kontakty. Proto budou tyto typy popsány podrobněji.

Geometrická nelinearita

Při sestavování celkové matice tuhosti se v případě malých deformací vychází z nedeformované konfigurace tělesa [14]. Tento předpoklad je možný považovat za správný, pokud posuvy jsou z hlediska změny geometrie tělesa zanedbatelné. V takovém to případě se totiž zanedbávají kvadratické členy geometrických vztahů a dostáváme inženýrský tenzor přetvoření, který lze vyjádřit jako:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right). \quad (32)$$

V případě velkých deformací je nutné si uvědomit, že celková matice tuhosti K závisí na momentální deformované konfiguraci tělesa. Takovému popisu toku materiálu odpovídá Lagrangeův přístup, kdy je v čase sledována trajektorie jednotlivých bodů tělesa. Tenzor přetvoření odpovídající Lagrangeovému popisu se nazývá Green Lagrangeův tenzor a je možné ho zapsat jako:

$$E^L_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \right). \quad (33)$$

Kontaktní nelinearita

Kontaktní úlohy jsou obecně silně nelineární a vyžadují větší požadavky na zkušenosti výpočtáře a na použitý hardware a software. Při spojení dvou kontaktních povrchů se náhle mění tuhost celého systému, což ve většině případů navyšuje výpočtový čas a zapříčiňuje problémy s konvergencí [14]. Jednotlivé typy kontaktních párů pak shrnuje Tab. 2.

Typ kontaktu	rozevření	skluz	Příklad
Bonded	ne	ne	Lepený spoj
No separation	ne	ano	Skluz bez tření a bez možnosti oddělení kontaktních povrchů
Rough	ano	ne	Oddělení kontaktních povrchů bez možnosti skluzu
Frictionless	ano	ano	Skluz bez tření
Frictional	ano	ano	Skluz se třením

Tab. 2 Typy kontaktních vazeb

Základní algoritmus kontaktních úloh

Tato metoda je založena na spojení dvou kontaktních povrchů pomocí fiktivních pružin. Jestliže dojde k vymezení počáteční vůle mezi kontaktními plochami, přiřadí se fiktivní pružině konkrétní hodnota normálové tuhosti k_n . V opačném případě bude $k_n = 0$. Jelikož normálová tuhost je konečná hodnota, dochází tak k určitému pronikání kontaktních povrchů podle rovnice (34).

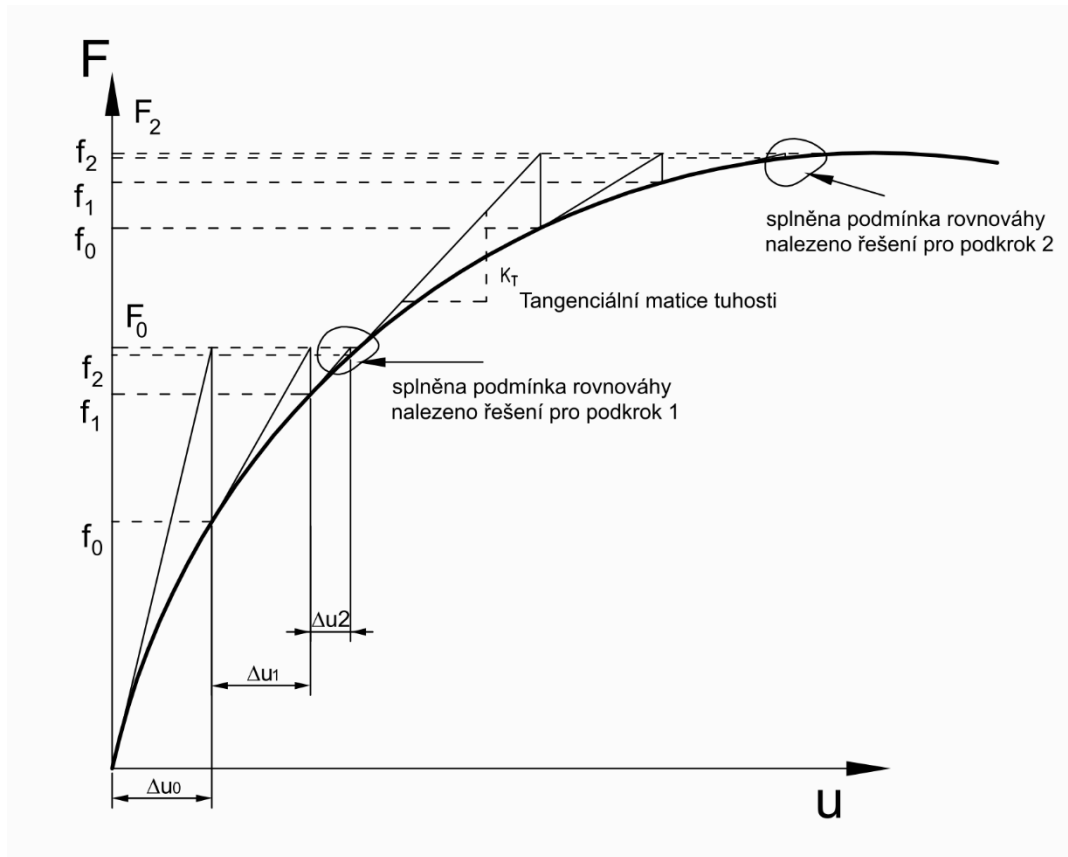
$$F = k_n x_p \quad (34)$$

Volba hodnoty normálové tuhosti vždy závisí od konkrétního výpočtu. Obecně platí, že vysoká tuhost vede k nízké penetraci, a tím k výborným výsledkům kontaktních tlaků, které jsou důležité zejména při posuzování únavové životnosti součástí. Tato nastavení však konvergují jen po vysokém počtu iterací a mnohdy vůbec. Nižší hodnoty k_n většinou vedou k lepší

konvergenci a kratším výpočtovým časům. Vždy je však na posouzení uživatele, zda jsou daná zjednodušení přijatelná.

Iterační metody k řešení nelineárních úloh MKP

K řešení nelineárních úloh se v rámci MKP nejčastěji používají přírůstkově iterační algoritmy, a to zejména Newton Raphsonova metoda (Obr. 18) [14].



Obr. 18 Newton Raphsonova iterační metoda

Její podstata spočívá v rozdělení zatížení do několika kroků.

$$F_j = \frac{F}{n} \quad (35)$$

kde F_j je zatížení v daném podkroku a n označuje celkový počet podkroků.

V každém z nich pak musí nastat rovnováha sil, která odpovídá hodnotě residua menšího, než je zvolena přesnost algoritmu.

Tangenciální matice tuhosti se pro daný stav zadá jako tečna ke křivce. Ze základní rovnice MKP pak plyne:

$$K_{Ti}\Delta u_i = F_j - K(u_i)u_i, \quad (36)$$

kde K_{Ti} je tangenciální matice tuhosti a Δu_i je přírůstek posuvů.

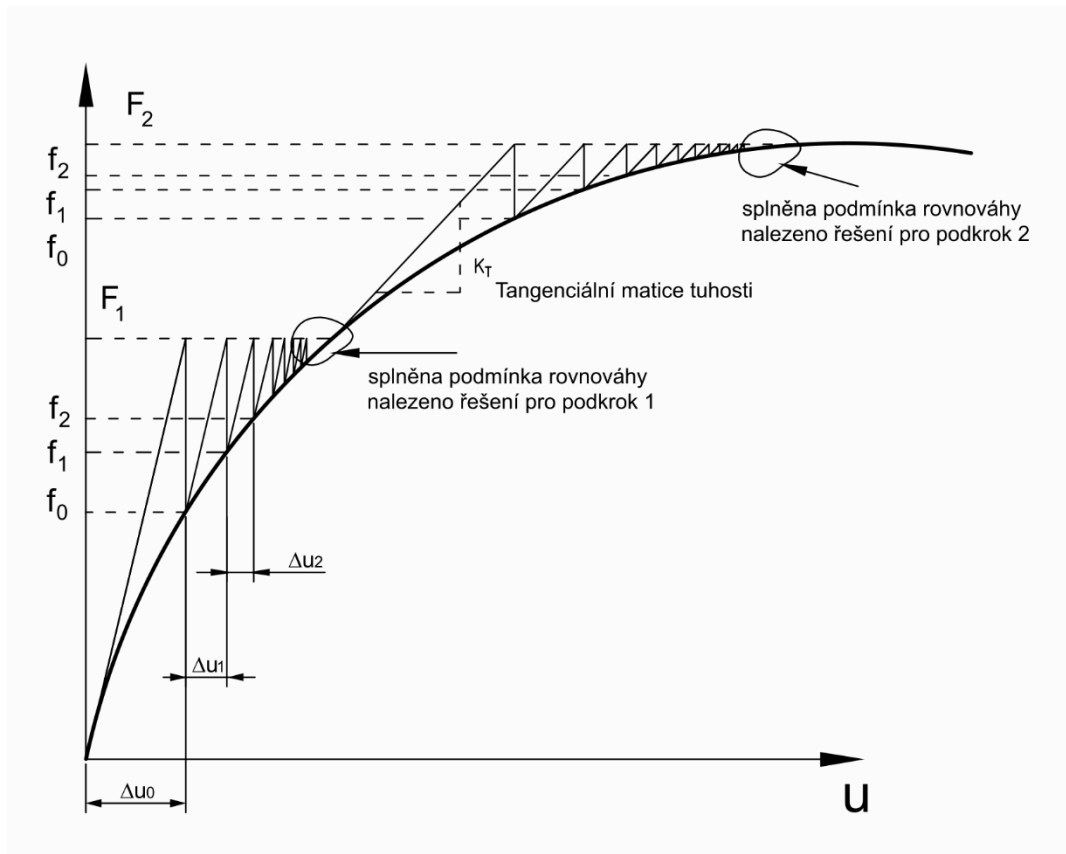
Hodnota residua R_i se určí jako:

$$R_i = F_j - K(u_i)u_i \quad (37)$$

Řešení pro daný podkrok se jeví jako vyhovující, pokud:

$$R_i < \varepsilon_F = 0,005F, \quad (38)$$

kde ε_F je hodnota požadované přesnosti, jež je v softwarech MKP většinou nastavena na hodnotu 0,5 % z celkového zatížení. Po nalezení řešení pro daný podkrok se zvýší hodnota zatížení na hodnotu F_{i+1} a algoritmus se opakuje. Časově nejnáročnější na zmíněné metodě je sestavování tangenciální matice tuhosti pro každou iteraci. Z tohoto důvodu je možné se setkat s modifikovanou formou Newton Raphsonovy iterační metody Obr. 19, při které je tangenciální matice tuhosti neměnná po celý řešený podkrok. To vede k většímu počtu potřebných iterací, které jsou však méně časově náročné.



Obr. 19 Modifikovaná Newton Raphsonova iterační metoda

2 Výpočtový model

Při řešení problému výpočtovým modelováním je ve většině případů nutné přijmout určitá zjednodušení. Jako nejzásadnější z nich je považování plechu ve výchozím stavu jako nedeformovaného a bez jakéhokoliv zbytkového napětí. Dle mého názoru je potřeba uvést všechny vlivy, které by na počáteční stav plechu mohly mít zásadní účinek a zároveň zdůvodnit, z jakého důvodu byla tato zjednodušení přijata.

2.1 Procesy ovlivňující napjatost v pásu plechu

Proces stříhání plechu na požadovanou šířku

Během výše uvedeného procesu probíhá dělení materiálu střížným nástrojem. S tímto procesem je samozřejmě spojen vznik napjatosti a plastické deformace v okolí volných okrajů. Na konzultacích ve společnosti ŽŽAS, a.s. jsme se tímto problémem zabývali a došli jsme k závěru, že okraje plechu tvoří ve většině případů kovový odpad. V průběhu prohlídky ve společnosti Brano a.s. jsem však získal vzorek, podle kterého jsem usoudil, že výrobní proces využívá celou šířku plechu. Ve výpočtu bude tedy nutné uvažovat nejen napětí za stavu RD, ale také napětí za stavu RN na volných okrajích. Zde je však zapotřebí si uvědomit, že výsledky z důvodu plastických deformací vzniklých střížným nástrojem nebudou zcela odpovídat realitě.

Proces navíjení plechu na svitek

Při tomto procesu může nastat plastická deformace celé šířky pásu. Velikost plastické deformace pásu závisí na okamžitém průměru svitku, tloušťce pásu a materiálových charakteristikách navíjeného pásu. Zkoumání napjatosti při zmiňovaném procesu není primárním předmětem této práce, a proto je mu věnována pouze část kapitoly 3.3.

Proces průchodu plechu rovnačkou

Plech po průchodu rovnacím procesem působí jako dokonale rovinný. Aby k tomuto stavu mohlo dojít, musí opět nastat plastická deformace plechu v rovnačce, a tím i vznik zbytkových napětí. Uvedená napětí budou mít náhodný průběh po tloušťce plechu. Při konzultacích ve společnosti ŽŽAS, a.s. jsme došli k závěru, že na základě jejich zkušeností z praktického provozu se tímto problémem nemám zabývat. U všech jejich výpočtů bylo zbytkové napětí vždy zanedbáno a při následné aplikaci do výrobního procesu nenastal problém. Přesto je této problematice věnována část kapitoly 3.3.

Dynamické chování plechu v zásobní smyčce

Při automatickém režimu dochází ke krokovému odběru plechu podavačem do lisu. Tento impuls způsobí, že se pás rozkmitá a kmitavý pohyb vykazuje během celé doby v automatickém režimu. Toto chování v práci uvažováno nebylo.

2.2 Vstupní parametry

Vstupními parametry pro výpočet deformačně napětové analýzy jsou:

- **Materiál pásu plechu**

Ocelový válcovaný plech navinutý do svitku
dle ČSN EN 10140, ČSN EN 10051

Mez kluzu R_e 1000 MPa

Mez pevnosti R_m 1250 MPa

- **Geometrie pásu plechu**

Tloušťka t 0,4 ÷ 8,0 mm

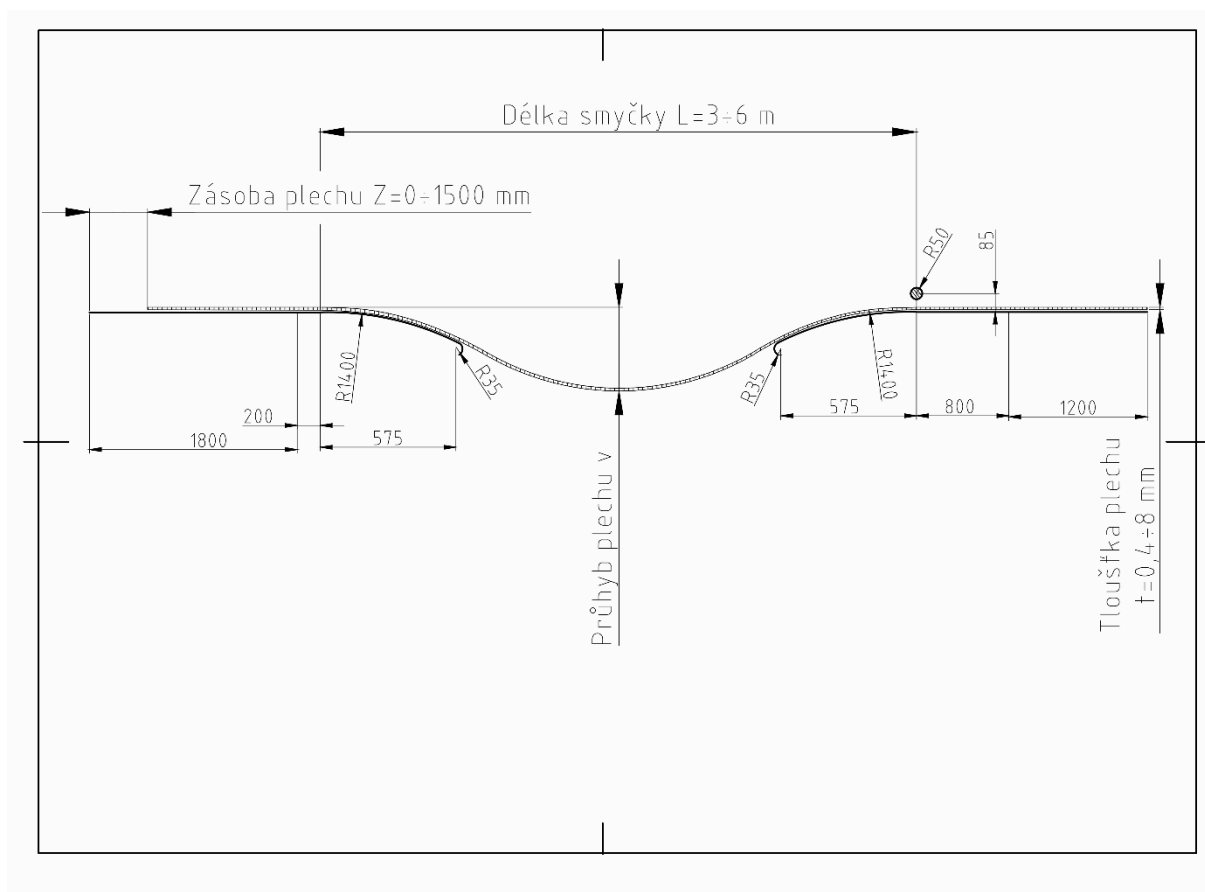
Šířka b 30 ÷ 800 mm

- **Geometrie zásobní smyčky**

Rozteč válečkových skluzů L 3 ÷ 6 m

Zásoba pásu ve smyčce Z 0 ÷ 1500 mm

Pro lepší představu jsou vstupní parametry zobrazeny na Obr. 20



Obr. 20 Zobrazení vstupních parametrů na výkrese

2.3 Model materiálu

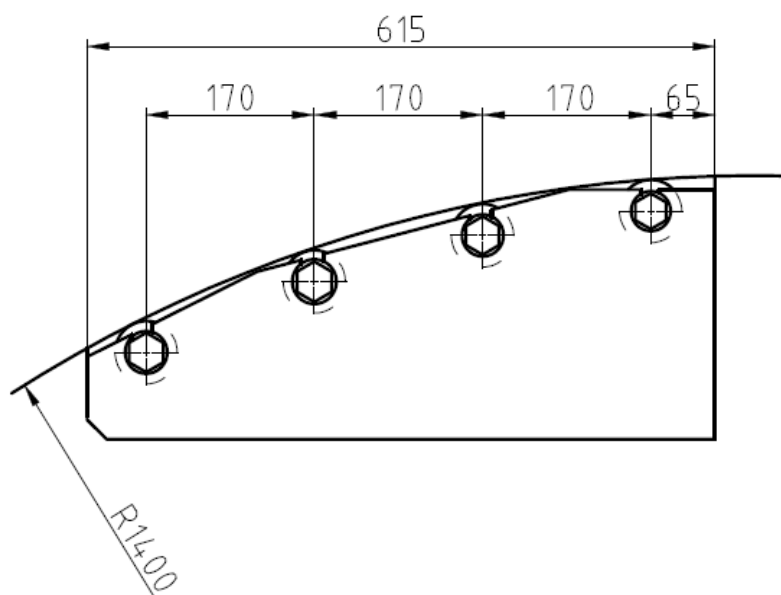
Model materiálu je určen dvěma charakteristikami: Youngův modul pružnosti $E = 210$ GPa a Poissonův poměr $\mu = 0,3$. Jedná se tak o materiál homogenní, izotropní a lineárně pružný.

2.4 Model geometrie

Model geometrie vychází z materiálu poskytnutých společností ŽĎAS, a.s.

Válečkový skluz

Válečkový skluz byl modelován podle výrobních výkresů společnosti ŽĎAS, a.s. Ve výpočtu byl aproximován křivkou o poloměru 1400 mm (Obr. 22), která je ve vzdálenosti 575 mm od počátku zakončena obloukem o poloměru 35 mm. Oblouk představuje poslední ze čtyř válečků a je v modelu proto, aby se zabránilo vzniku hrany. Ta by mohla zapříčinit problémy s konvergencí. Zde je nutné uvést, že tvar byl stanoven na základě výpočtů pro smyčku dlouhou 5 m. Tato geometrie napomáhá ke snížení napjatosti plechu v místě válečkového skluzu, a tím také k tomu, že se plech v tomto místě tzv. nezlomí. Na konzultacích mi bylo řečeno, že tento tvar je neměnný a bude se používat pro všechny délky smyčky. V ideálním případě by bylo vhodné určit novou geometrii válečkového skluzu pro všechny délky smyčky. Tato záležitost však není předmětem této diplomové práce.



Obr. 21 Geometrie válečkového skluzu (zjednodušeno) [2]

Plech

Geometrie plechu je kvádr, jehož rozměry jsou: délka l , šířka b a tloušťka t .

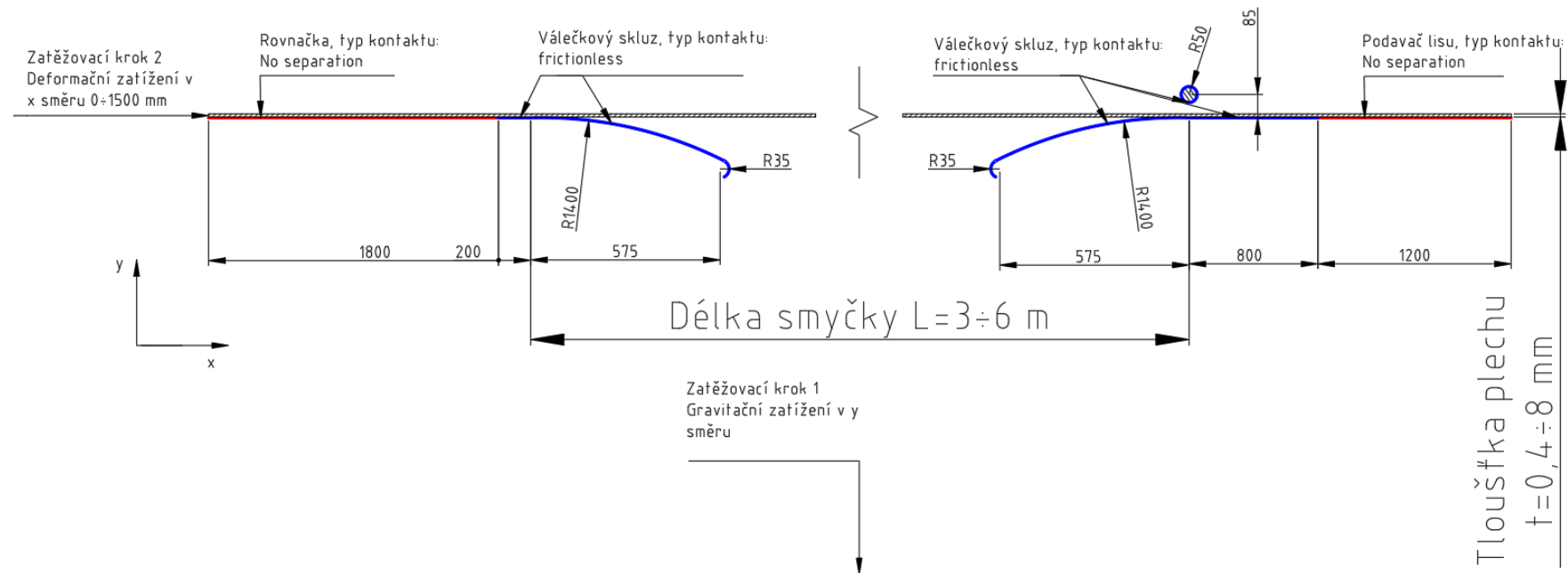
Rovnačka a podavač lisu

Rovnačka s podavačem do lisu byly aproximovány zvolenými kontakty, které vhodně popisují deformaci plechu v daném místě. Jednotlivé kontaktní páry jsou blíže popsány na Obr. 22.

Přítlačný válec

Prostor mezi podavačem do lisu a válečkovým skluzem na výstupu z linky se liší dle použitého typu podavače. Při konzultacích ve firmě BRANO a.s. jsem se setkal s řešením přítlačného válce a plechové štěrbin. V obou případech však omezovač deformace nepovolil větší prohnutí plechu než 35 mm. Ve výpočtu byla zvolena varianta s přítlačným válcem o poloměru 50 mm.

2.5 Model okrajových podmínek, vazeb a zatížení



Obr. 22 Model okrajových podmínek, vazeb a zatížení

Jedná se o nelineární úlohu z důvodu kontaktních vazeb a aktivovaných velkých deformací. V prvním zatěžovacím kroku působí na plech jen gravitační síla. Gravitační zrychlení bylo uvažováno $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$. Vzhledem k tomu se plech nepatrně prohne a vytvoří se potřebná imperfekce. V následujícím zatěžovacím kroku působí deformační zatížení na levý konec plechu a díky imperfekci se ihned vytvoří požadovaný deformovaný tvar, kterým se tvoří zásoba plechu před lisem.

3 Výpočet

Všechny výpočty byly provedeny v učebně A02/716 VUT FSI na školním počítači s výukovou licencí softwaru ANSYS Workbench 19 R3.

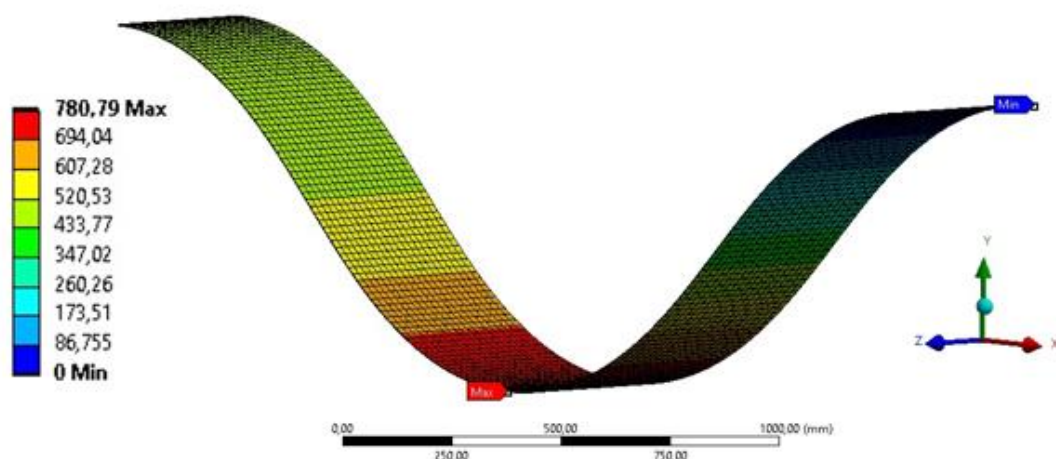
3.1 Výpočet modelu I. úrovně

Výpočtový model I. úrovně byl vytvořen za účelem zjištění citlivosti výstupních parametrů na zadané vstupy. Výsledky nám poskytly představu o tom, jaká zjednodušení je možné si v rámci této úlohy dovolit, jakou použít konečno prvkovou síť, a především jak nastavit výpočtovou analýzu, aby úloha byla stabilní a konvergovala ke správným výsledkům. Výpočtový model I. úrovně je zatížen stejným charakterem namáhání jako je zobrazeno na Obr. 22. Jedná se o úlohu bez kontaktních vazeb, při které se vyhneme problémům s konvergencí. Typ napjatosti a charakter deformace však zůstává stejný jako u všech následujících modelů. Parametry tohoto výpočtu jsou:

délka $l = 3000 \text{ mm}$,	tloušťka $t = 3 \text{ mm}$,
šířka $b = 800 \text{ mm}$,	zásoba $Z = 500 \text{ mm}$.

Tab. 3 Parametry modelu I. úrovně

Celková deformace pásu plechu při výpočtu je zobrazena na Obr. 23. Pravý konec pásu je vetknutý, levý konec se posunuje ve směru x o 500 mm. Posuvy ve zbylých směrech jsou zamezeny. Hodnoty deformace jsou uvedeny v mm.



Obr. 23 Celková deformace modelu I. úrovně [mm]

3.1.1 Volba typu prvků

K řešení tohoto problému metodou konečných prvků se dá přistupovat vícero způsoby. V této kapitole budou znázorněny kroky, jimiž se úloha zjednoduší do řešitelného stavu bez toho, aby došlo k odchýlení od požadovaných výsledků. Postupně se provedou výpočty 3D modelu s prostorovými prvky, skořepinovými prvky a nakonec 2D modelu, které se vzájemně porovnají. Poté se vybere ta nejvhodnější varianta z hlediska výpočtového času při stejných hodnotách výstupních parametrů. Závěry zkoumání shrnuje Tab. 4.

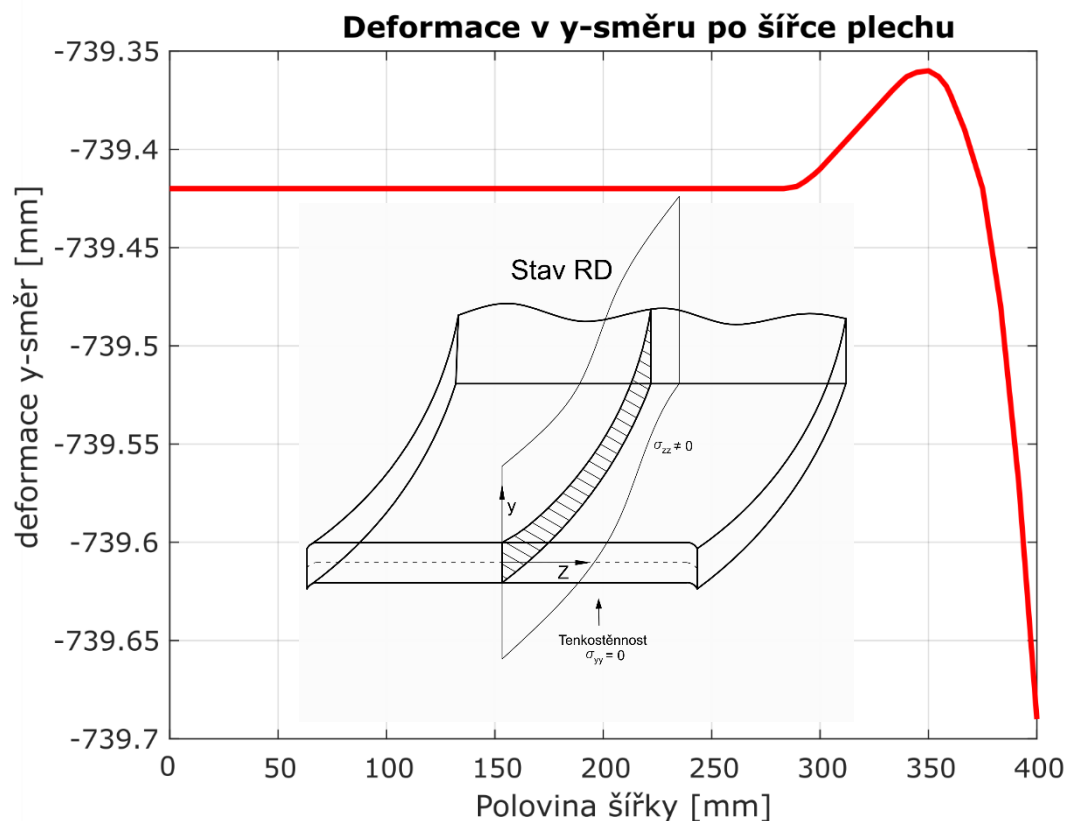
	3D model	3D model + symetrie	3D model + symetrie	2D model RN a RD
Typ prvku:	Solid 186	Solid 186	Shell 281	Plane 183
Počet prvků:	36895	21 195	8 250	1 926 a 1 926
Čas výpočtu:	12 h 56 min	4 h 52 min	8 min 45 s	52 s a 44 s
Počet iterací:	277	236	165	176 a 175
Maximální průhyb v [mm]:	739,68	739,68	739,69	739,44
Maximální redukované napětí RN (volný okraj) [MPa]:	610,0	610,0	608,7	517,4
Maximální redukované napětí RD (střed pásu) [MPa]:	504,2	504,2	506,3	506,3

Tab. 4 Srovnání výpočtů při použití různých typů konečných prvků

Počet iterací a výpočtový čas závisí na počtu zvolených podkroků v dané analýze. Z výsledků na zjednodušeném modelu však vyplývá, že nejvýhodnější by bylo provést dva 2D výpočty za stavu RN a RD. Při porovnání napětí za stavu RN však vychází hodnoty, které se neshodují s 3D výpočtem. Proto bude dále zkoumáno, jaký vliv na napjatost a deformaci má zadaná šířka pásu a jak se napjatost přerozdělí při přechodu z RD na RN.

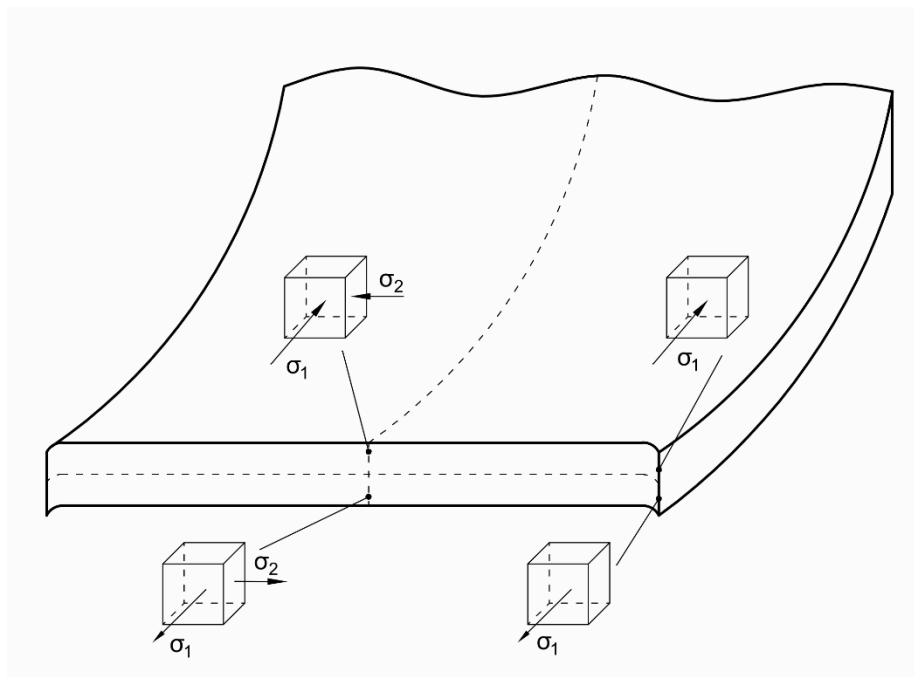
3.1.2 Průběh napětí a deformace po šířce plechu

V této podkapitole bude blíže popsán průběh napětí a deformace po šířce plechu.



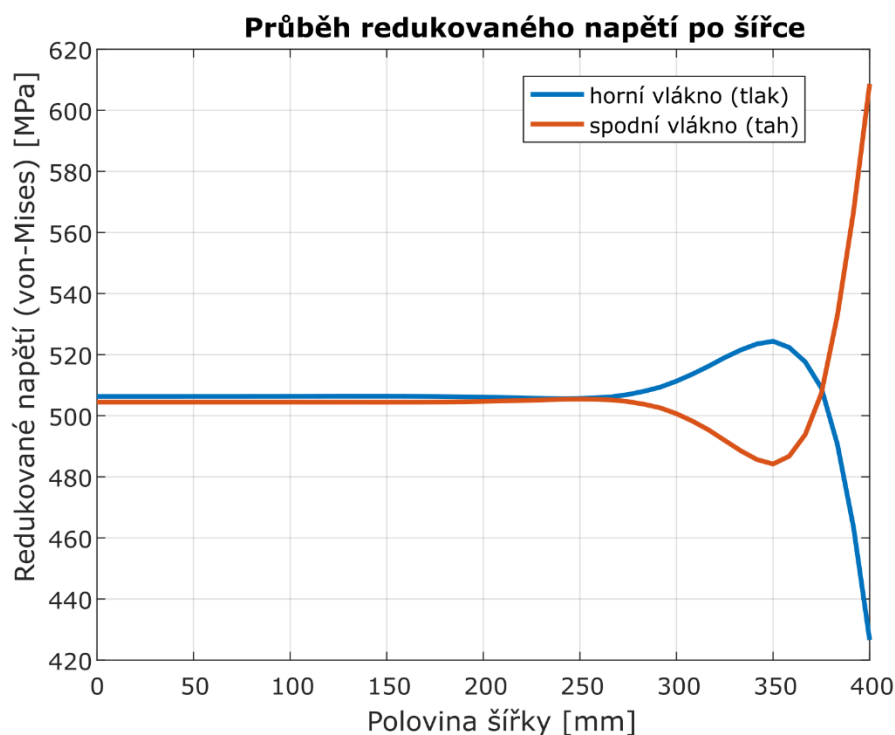
Obr. 24 Deformace po šířce plechu

Nulová šířka na Obr. 24 představuje hodnotu ležící na rovině symetrie, tzn., že v tomto místě převládá stav RD. Volný povrch plechu představuje stav rovinné napjatosti. Na Obr. 24 je znázorněno, jak se plech deformuje do tzv. „koryta“. Tento efekt je však pouhým okem těžce pozorovatelný, protože hodnoty deformace se pohybují v řádech desetin milimetrů. Jiná situace nastává v případě, že budeme pozorovat hodnoty napětí. Napjatostní stavy vyskytující se uprostřed a na okraji pásu plechu jsou zobrazeny na Obr. 25.



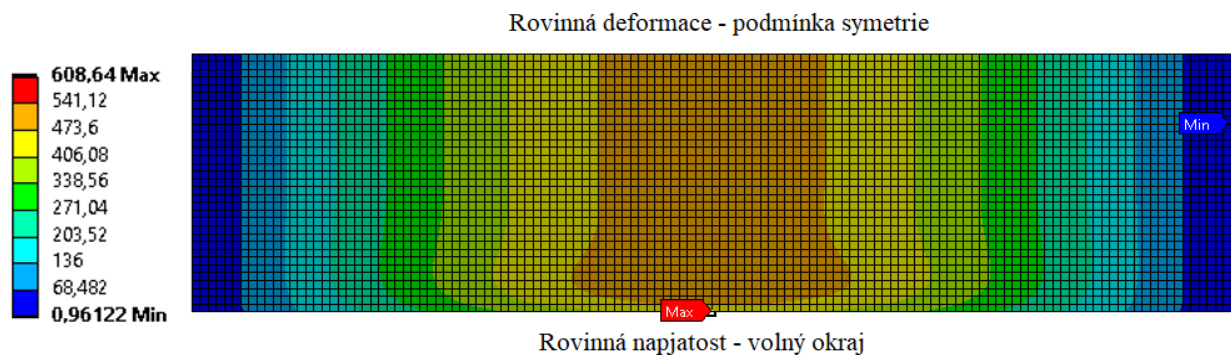
Obr. 25 Napjatostní stavy na pásu plechu

Počáteční předpoklad zněl, že napjatost bude nezávislá na šířce plechu. Tuto hypotézu můžeme považovat za platnou pouze v případě, že plech je dostatečně široký na to, aby bylo možné od sebe odlišit stavy RN a RD. Z Obr. 26 je patrné, že vyšší hodnota redukovaného napětí na okraji vychází na spodním vlákně. Uprostřed se pak jeví jako kritičtější vlákno horní.

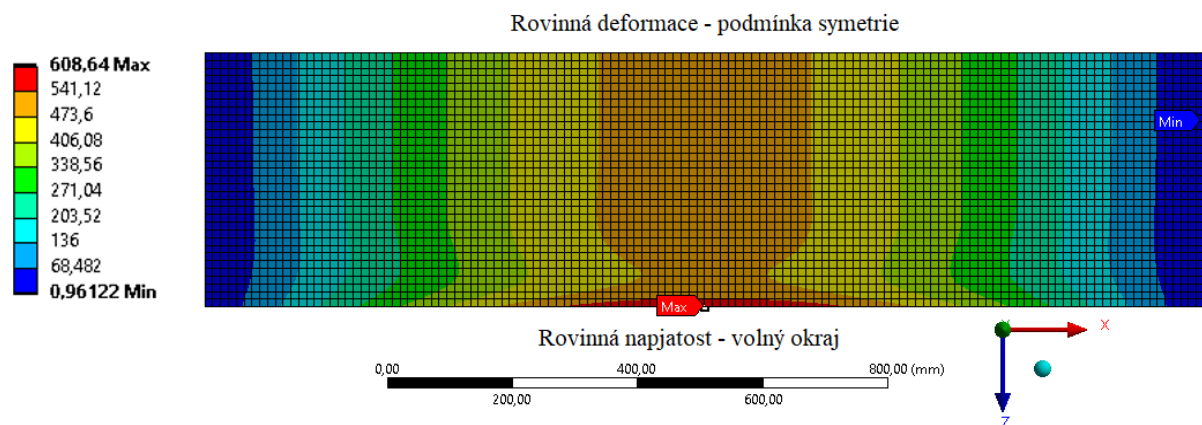


Obr. 26 Průběh redukovaného napětí po šířce plechu

Případ řešený pomocí MKP lze vidět na Obr. 27 a Obr. 28, kde stav RD je vyvolán podmínkou symetrie. K řešení tak stačí pouze polovina šířky plechu. Hodnoty redukovaného napětí jsou uvedeny v $[MPa]$.



Obr. 27 Redukované napětí (von-Mises) – horní vlákno (tlak)



Obr. 28 Redukované napětí (von-Mises) – spodní vlákno (tah)

Hodnoty napětí pro kritická místa pak znázorňuje Tab. 5.

	σ_{red} [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_z [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]
RN (volný okraj)	608,7	607,92	0	-1,95	607,92	0	-1,95
RD (střed pásu)	506,3	-569,6	0	-170,6	0	-170,7	-569,6

Tab. 5 Hodnoty napětí pro kritická místa

Poměr mezi $\frac{\sigma_{redRN}}{\sigma_{redRD}}$ odpovídá korekčnímu součiniteli, který bude značen zkratkou K_{nd} a v tomto konkrétním případě vychází 1,203. Podobné závěry zkoumání napjatostně deformačního stavu na ohýbaném pásu plechu vyšly také v článku [15]. V následující podkapitole bude zkoumán vliv vstupních parametrů na hodnotu tohoto součinitele.

3.1.3 Stanovení korekčního součinitele pro různé parametry smyčky.

Pro určení tohoto součinitele bude provedena řada výpočtů na zjednodušeném modelu uvedeném výše. Jako proměnné vstupní hodnoty se budou uvažovat tloušťka t , délka smyčky L a zásoba Z . Hodnota šířky plechu je zvolena tak, aby bylo možné zřetelně rozeznat stav RD a RN. Výsledky jsou shrnuty v tabulce Tab. 6. Zjednodušený model je tvořen skořepinovými kvadratickými prvky Shell 281 o velikosti 10 mm.

Délka smyčky 6 [m]								
Tloušťka plechu [mm]								
Zásoba [mm]		0,4	1,5	3	5	6	7	8
	500	1,257	1,216	1,209	1,205	1,205	1,204	1,204
	750	1,232	1,211	1,207	1,205	1,204	1,204	1,203
	1000	1,220	1,209	1,207	1,205	1,204	1,203	1,203

Délka smyčky 5 m								
Tloušťka plechu [mm]								
Zásoba [mm]		0,4	1,5	3	5	6	7	8
	500	1,228	1,210	1,206	1,204	1,203	1,202	1,201
	750	1,214	1,207	1,205	1,204	1,203	1,202	1,202
	1000	1,205	1,207	1,205	1,204	1,203	1,202	1,201

Délka smyčky 3 m								
Tloušťka plechu [mm]								
Zásoba [mm]		0,4	1,5	3	5	6	7	8
	500	1,203	1,204	1,203	1,201	1,200	1,200	1,199
	750	1,197	1,203	1,202	1,200	1,199	1,199	1,198
	1000	1,192	1,201	1,202	1,200	1,199	1,198	1,197

Tab. 6 Hodnoty korekčního součinitele pro různé parametry smyčky

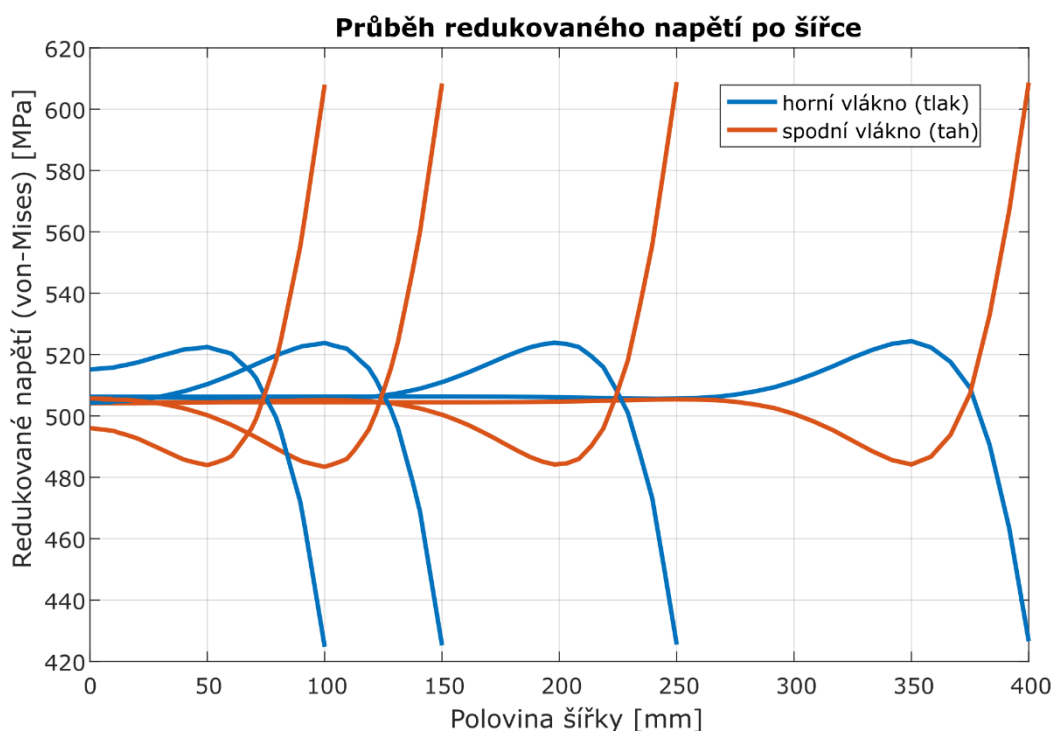
Z Tab. 6 je zřejmé, že korekční součinitel se pro různé parametry smyčky mění v řádech setin. Z tohoto poznatku byla určena hodnota $K_{nd} = 1,205$, jenž se stanovila jako aritmetický průměr všech vypočítaných součinitelů.

Jak již bylo zmíněno, toto řešení předpokládá dostatečnou šířku plechu na to, aby bylo možné na průběhu napětí poznat ustálení v místě RD. S ohledem na vstupní parametry je však nezbytné se zabývat také plechy, které jsou výrazně užší.

3.1.4 Průběh napětí a deformace na úzkém plechu

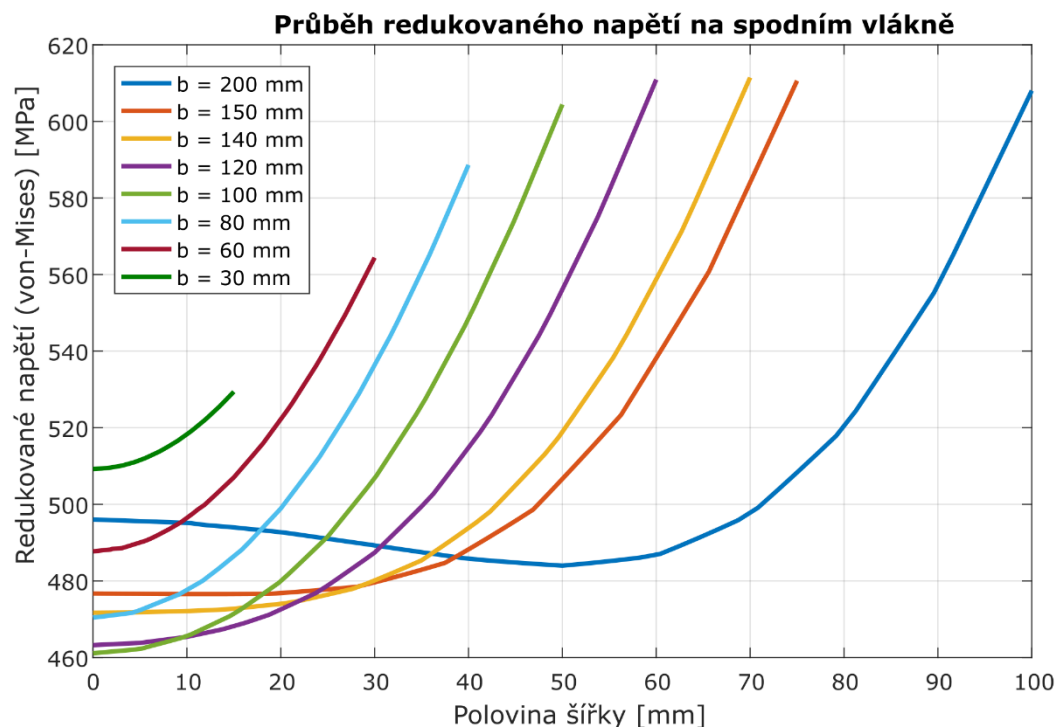
V této podkapitole bylo hlavním cílem porovnat průběh napětí a deformace na plechu, jehož šířka je menší než 500 mm, s průběhem na Obr. 26. Zejména pak bylo nutné zjistit, zda takto úzký plech je z hlediska napjatosti kritičtější než plech široký. V případě, že hodnoty maximálního redukovaného napětí by vyšly nižší, bylo by možné aplikovat výsledky z širokého plechu na plech úzký.

Ke zjištění průběhů napětí na úzkém plechu byl využit stejný výpočtový model jako v Tab. 3. Jediným proměnným parametrem byla šířka plechu b , která nabývala hodnot od 30 mm do 800 mm. Na Obr. 29 jsou zobrazeny výsledky pro rozměry 200, 300, 500 a 800 mm (jedná se o symetrickou úlohu, proto pouze polovina pásu), ze kterých je zřejmé, že minimální šířka plechu pro jednoznačné odlišení stavu RN a RD je pro tyto parametry modelu 300 mm.

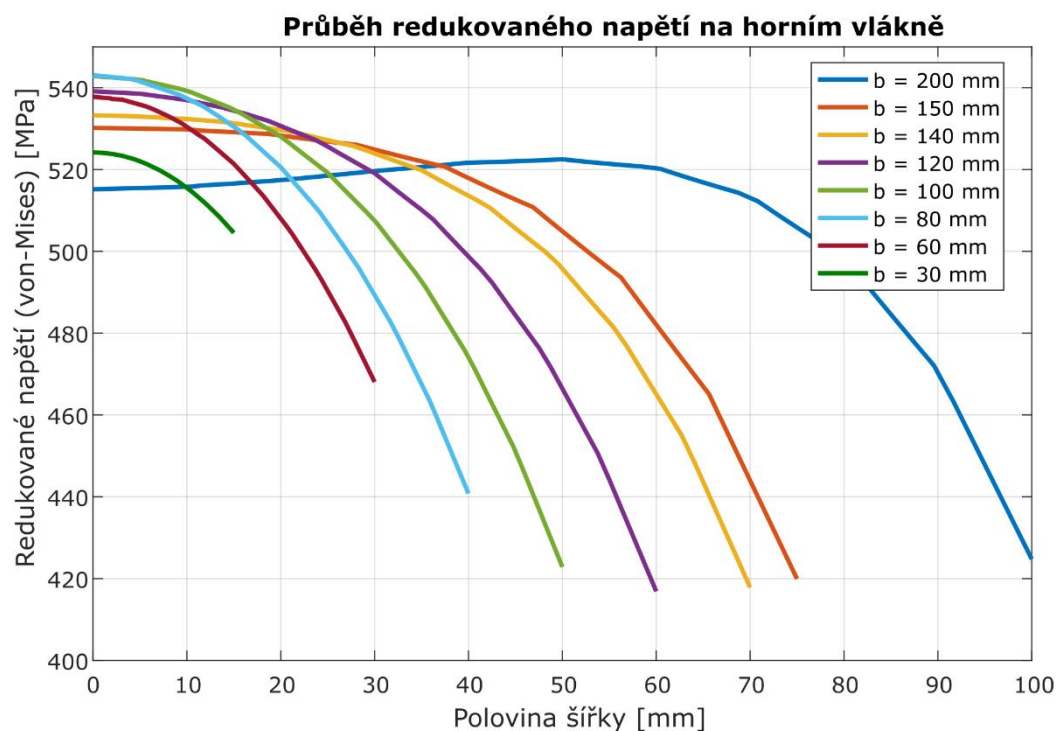


Obr. 29 Průběh redukovaného napětí pro různé šířky plechu

Od této hodnoty je tedy možné prohlásit, že napjatost je na šířce nezávislá. Průběhy napětí na horním a spodním vlákne pro parametr šířky menší než 200 mm jsou zobrazeny na Obr. 30 a Obr. 31.



Obr. 30 Průběh redukovaného napětí na spodním vlákně pro úzké plechy



Obr. 31 Průběh redukovaného napětí na horním vlákně pro úzké plechy

Z průběhů napětí je patrné, že již nelze jednoznačně rozlišit stav RN a RD. Oba volné okraje se totiž vzájemně ovlivňují. Z výsledků na Obr. 31 lze pozorovat nárůst redukovaného napětí uprostřed plechu. Jeho maximální hodnota ale nepřekročí hodnotu na volném okraji, který tak i nadále zůstává kritickým místem. Touto analýzou bylo dokázáno, že řešení na dostatečně širokém plechu je použitelné i pro plechy úzké. Výsledky jsou sice konzervativnější,

ale je zaručeno, že nedojde k dosažení MS pružnosti. Všechny následující výpočty jsou tak provedeny pro plechy s dostatečnou šířkou.

3.2 Výpočtový model II. úrovně

Výpočtový model II. úrovně zahrnuje celou geometrii zásobní smyčky podle Obr. 22. V kapitole 3.1.2 byla popsána a ověřena všechna zjednodušení, díky kterým je možné úlohu řešit jako 2D. Na tomto modelu bylo provedeno celkem 28 výpočtů, které zahrnovaly všechny kombinace vstupních proměnných viz. Tab. 7. Ve všech výpočtech bylo aplikováno deformační zatížení 1500 mm jako posuv plechu v horizontálním směru.

Délka smyčky L	Tloušťka plechu t	Délka smyčky L	Tloušťka plechu t
$L = 3\text{ m}$	$t = 0,4\text{ mm}$	$L = 4\text{ m}$	$t = 0,4\text{ mm}$
	$t = 1,5\text{ mm}$		$t = 1,5\text{ mm}$
	$t = 3\text{ mm}$		$t = 3\text{ mm}$
	$t = 5\text{ mm}$		$t = 5\text{ mm}$
	$t = 6\text{ mm}$		$t = 6\text{ mm}$
	$t = 7\text{ mm}$		$t = 7\text{ mm}$
	$t = 8\text{ mm}$		$t = 8\text{ mm}$
Délka smyčky L	Tloušťka plechu t	Délka smyčky L	Tloušťka plechu t
$L = 5\text{ m}$	$t = 0,4\text{ mm}$	$L = 6\text{ m}$	$t = 0,4\text{ mm}$
	$t = 1,5\text{ mm}$		$t = 1,5\text{ mm}$
	$t = 3\text{ mm}$		$t = 3\text{ mm}$
	$t = 5\text{ mm}$		$t = 5\text{ mm}$
	$t = 6\text{ mm}$		$t = 6\text{ mm}$
	$t = 7\text{ mm}$		$t = 7\text{ mm}$
	$t = 8\text{ mm}$		$t = 8\text{ mm}$

Tab. 7 Kombinace vstupních parametrů

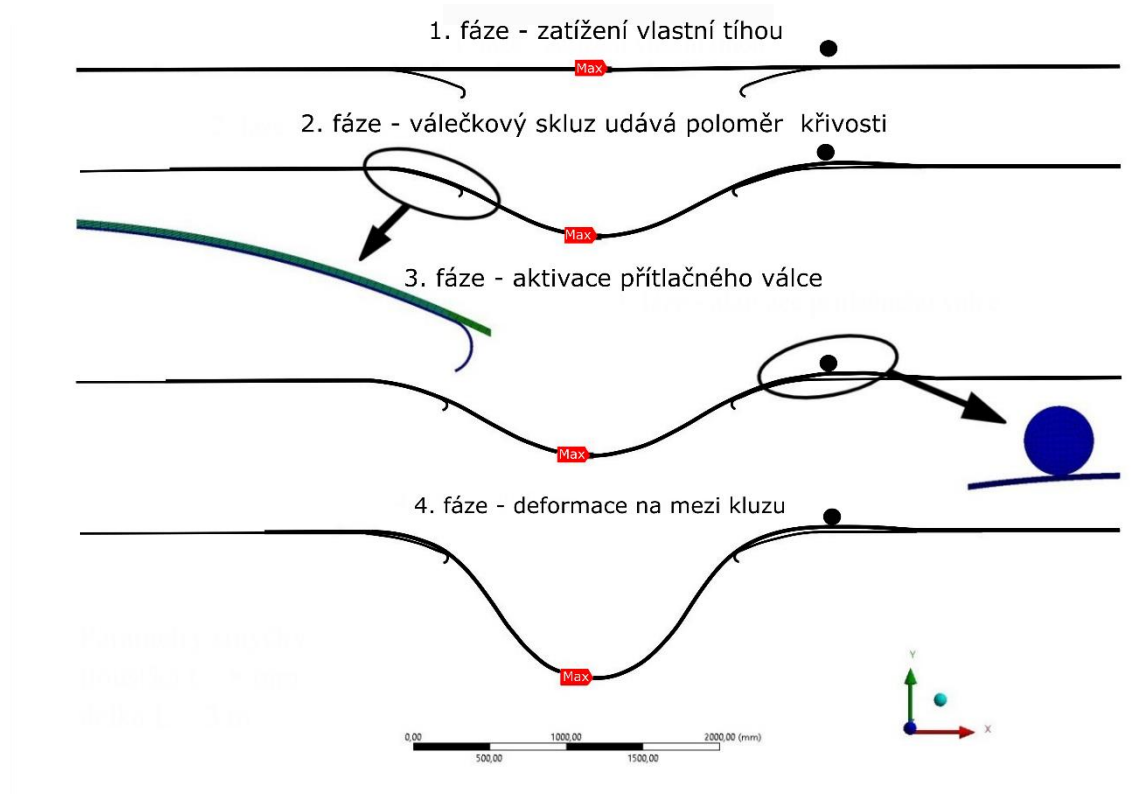
Jelikož je uvažován materiál homogenní, lineární a ideálně pružný, který vykazuje mez kluzu 1000 MPa, je nutné z výsledkového souboru použít pouze ta data, u nichž redukované napětí nepřesáhne mezní hodnotu 1000 MPa. Za mezí kluzu by materiál začal vykazovat plastickou deformaci a napjatostně deformační stav by se odlišoval od použitého lineárního modelu materiálu.

Pro tuto analýzu byly zvoleny kvadratické rovinné prvky PLANE 183. Při vytváření sítě byla tloušťka plechu diskretizována vždy minimálně 5 prvky o velikosti 10 mm, čímž je zaručeno, že výpočet vhodně popíše lineární průběh napětí po tloušťce plechu. Kontaktní vazby byly aplikovány stejně jako na Obr. 22. Takovéto nastavení nejlépe reflektuje skutečnou zásobní smyčku, s níž jsem se setkal při konzultacích ve firmě BRANO a.s. Pro všechny kontakty byla použita přibližně stejná nastavení podle návodu ke cvičení [16]. Při řešení bylo vypořádováno, že největší vliv na konvergenci má nastavení normálové tuhosti kontaktu. Nižší hodnoty tohoto parametru mají za následek pronikání kontaktních povrchů do sebe. Při vysoké hodnotě penetrace by se mohlo stát, že deformovaný tvar plechu v zásobní smyčce by neodpovídal realitě. Jako další negativní vliv je možné zmínit odlišný kontaktní tlak mezi dvěma tělesy. Celková penetrace se však v tomto případě pohybovala v řádech setin milimetrů, a proto je zjednodušení možné brát za přijatelné. Největší problémy se stabilitou výpočtu se vyskytly u plechů s tloušťkou 0,4 a 1,5 mm. Zde bylo zapotřebí výrazně navýšit počet podkroků řešení, a tím tzv. „zjemnit“ aplikované zatížení. Pro tyto parametry je možné úlohu nazvat jako špatně podmíněnou, poněvadž malému zatížení na vstupu odpovídají velké deformace na výstupu.

3.2.1 Zpracování výsledků

Veličinami popisujícími deformačně napjatostní stav byly v tomto případě redukované napětí podle teorie HMM a deformace plechu ve vertikálním směru. Tyto hodnoty byly určeny v závislosti na délce smyčky, tloušťce plechu a hodnotě deformačního zatížení.

Průběh deformace ve vertikálním směru lze rozdělit do čtyř fází zobrazených na Obr. 32.

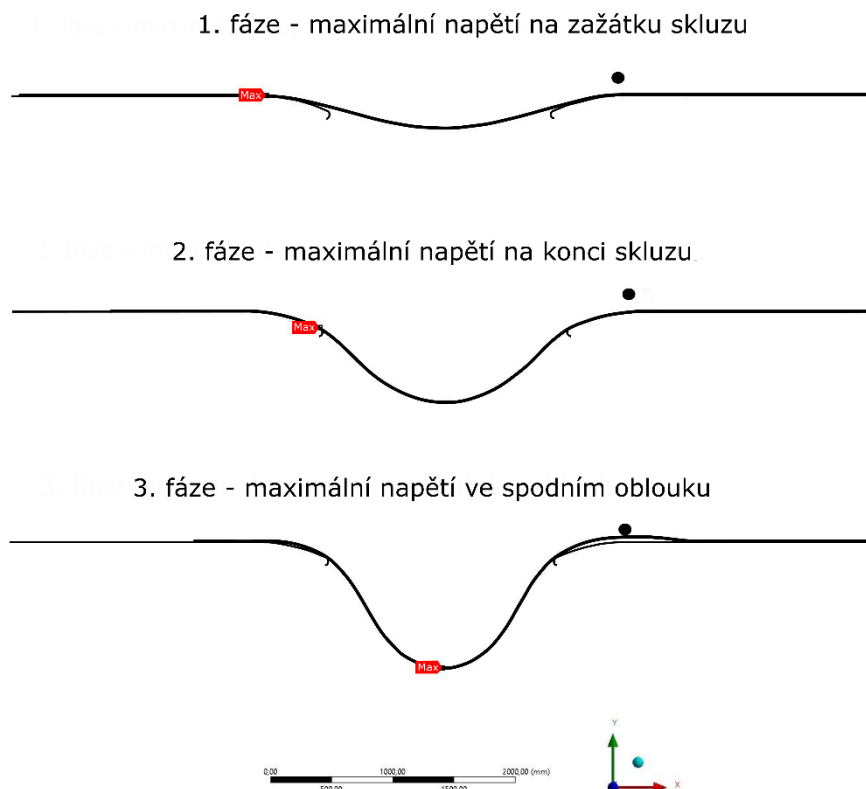


Obr. 32 Deformace pásu v zásobní smyčce pro parametry $L = 3 \text{ m}$, $t = 8 \text{ mm}$

V první fázi dochází k prohnutí pásu pouze vlivem vlastní tíhy. Díky tomu se při horizontálním posuvu jednoho konce okamžitě začíná tvořit požadovaný tvar zásobní smyčky. Druhá a třetí fáze je charakterizována aktivací vazeb modelu. Nejprve se poloměr křivosti plechu vstupního a výstupního oblouku přizpůsobí tvaru válečkového skluzu. Následně se omezí vertikální deformace pásu pomocí přítlačného válce. Poslední fází je maximální průhyb, při kterém dochází ke vzniku prvních plastických deformací.

Obecně lze variantu na Obr. 32 považovat za tu vůbec nejkritičtější. Jedná se totiž o nejkratší zásobní smyčku s nejsilnějším, a proto také nejtužším pásem plechu. Maximální zásoba pro tento případ je pouhých 170 mm. Zde je nutné zdůraznit, že zobrazený průběh neodpovídá všem počítaným smyčkám. U plechů o tloušťce $t = 0,4 \text{ mm}$ a $t = 1,5 \text{ mm}$ se plech chová poddajněji a vůbec tak nedojde ke kontaktu s přítlačným válcem.

V případě napjatosti se po délce pásu vyskytovala tři místa s maximální hodnotou redukováného napětí, která je možné vidět na Obr. 33.



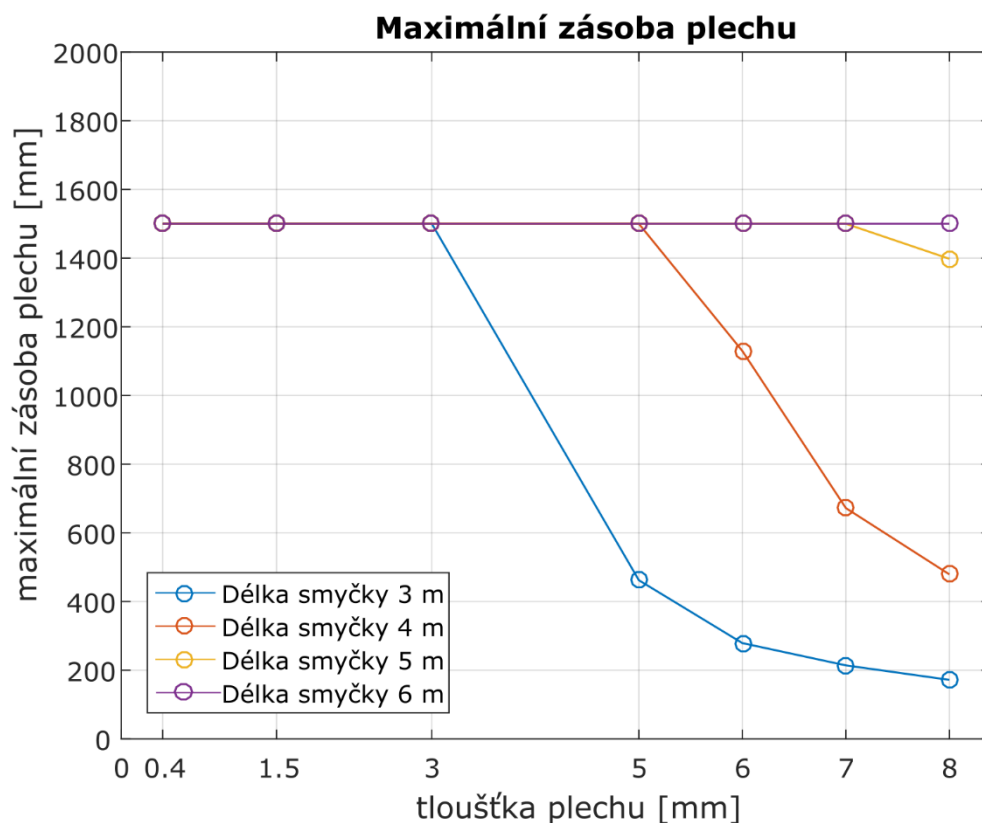
Obr. 33 Místa s maximální hodnotou redukovaného napětí

V první fázi se nekritičtější místo nachází na začátku válečkového skluzu. Pás plechu v tomto okamžiku není se skluzem v kontaktu, a ten tak prozatím nefunguje jako dostatečná podpora. V následující fázi již křivost vstupního a výstupního oblouku odpovídá tvaru skluzu a ten tak plní svou funkci. O tom, zda kritické místo bude na konci skluzu nebo na spodním oblouku rozhoduje tloušťka plechu. Obecně lze usoudit, že vyšší napětí na spodním oblouku vykazují plechy s tloušťkou $t \geq 3 \text{ mm}$.

Výstupem výpočtu bylo stanovení následujících veličin:

- Maximální možná zásoba plechu ve smyčce
- Maximální průhyb pásu plechu
- Maximální redukované napětí dle teorie HMM

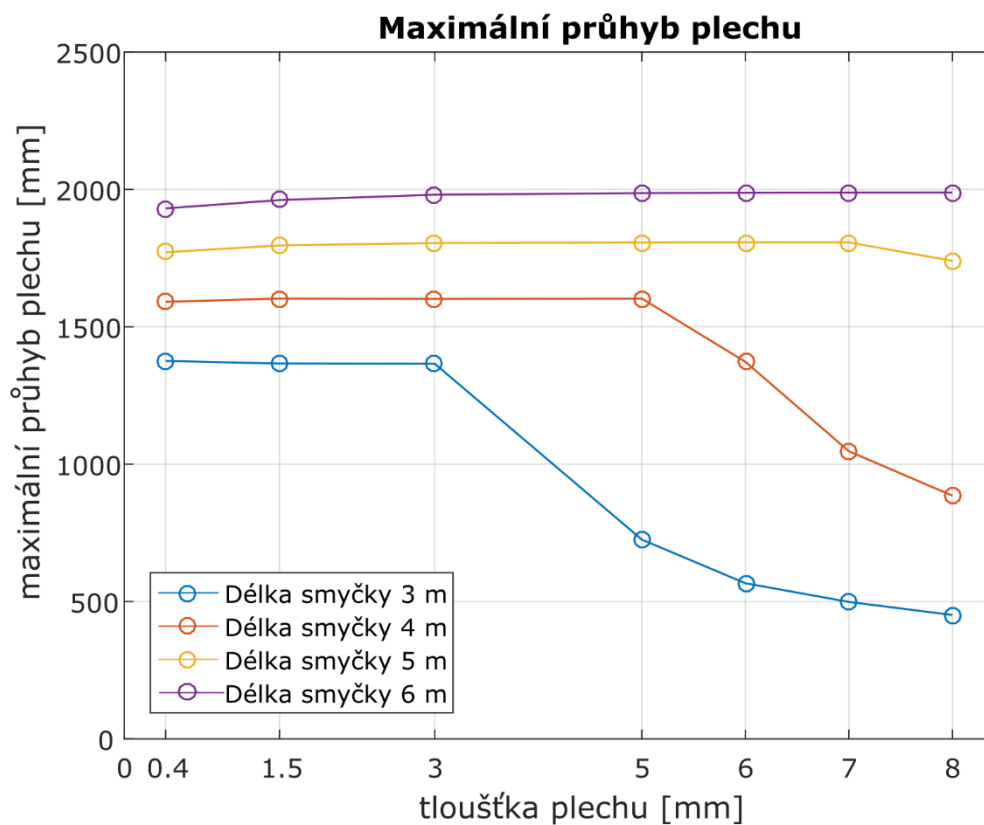
Tyto hodnoty jsou pro jednotlivé parametry smyčky zobrazeny na Obr. 34 - Obr. 37. Pro jejich stanovení byla použita dvě kritéria. Prvním z nich bylo kritérium maximálního redukovaného napětí, které nesmělo překročit mez kluzu 1000 MPa. Pokud tato hodnota nebyla dosažena, bylo použito druhé kritérium maximální zásoby, která byla na konzultacích ve společnosti ŽĐAS, a.s. stanovena na 1500 mm. To, jaká podmínka byla při vyhodnocení využita, je nejlépe vyobrazeno na Obr. 34, který vyjadřuje závislost mezi maximální zásobou a tloušťkou plechu pro jednotlivé délky smyčky.



Obr. 34 Maximální zásoba plechu

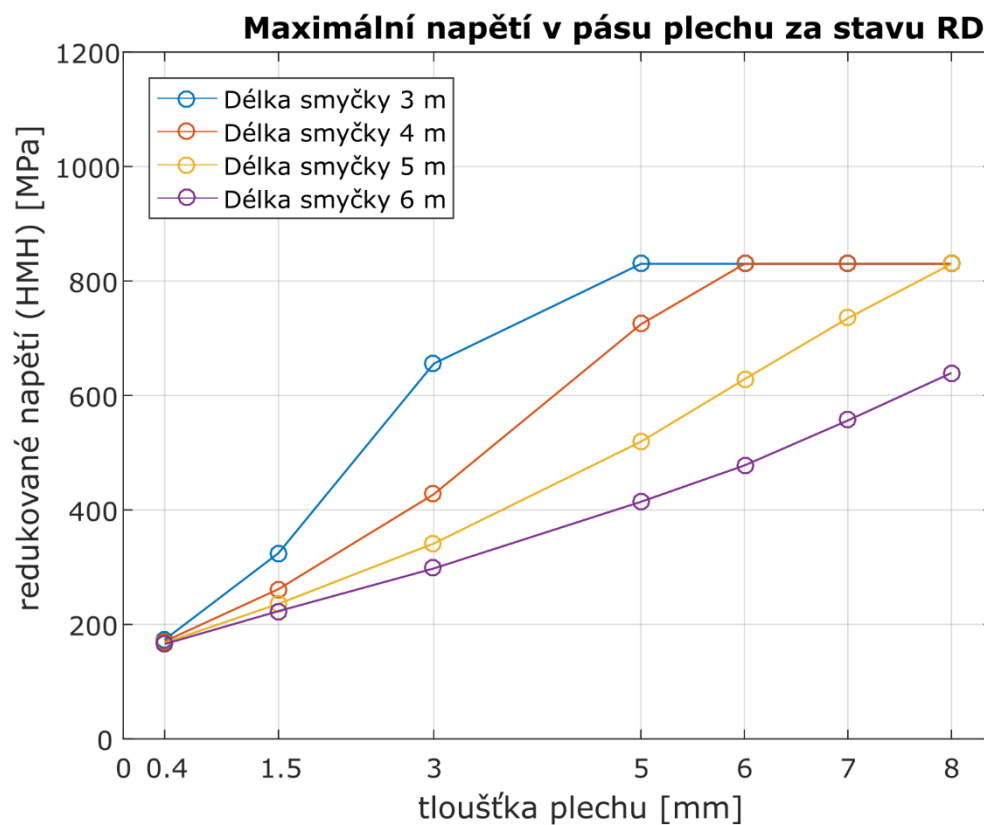
Z obrázku je patrné, že zásoba pro délku smyčky $L = 6 \text{ m}$ je pro všechny tloušťky maximální. Z toho vyplývá, že v pásu plechu nebyla ani v jednom případě překročena mez kluzu. Jiná situace nastává pro ostatní délky, kde již kritérium maximálních redukovaných napětí použito být muselo, a tím byla také omezena zásoba pásu ve smyčce.

Další z požadovaných výstupních veličin byl maximální průhyb. Tyto údaje poslouží ke stanovení potřebné výšky, do které má být linka umístěna, popřípadě ke zjištění hloubky díry pod zásobní smyčkou. Maximální hodnoty této veličiny jsou na Obr. 35, z něhož je zřejmé, že s narůstající délkou zásobní smyčky narůstá také hodnota maximálního průhybu. Pro jednu konkrétní délku smyčky se pak hodnota příliš nemění. Lehký pokles je možné pozorovat pro plechy s tloušťkou $t \leq 3 \text{ mm}$.

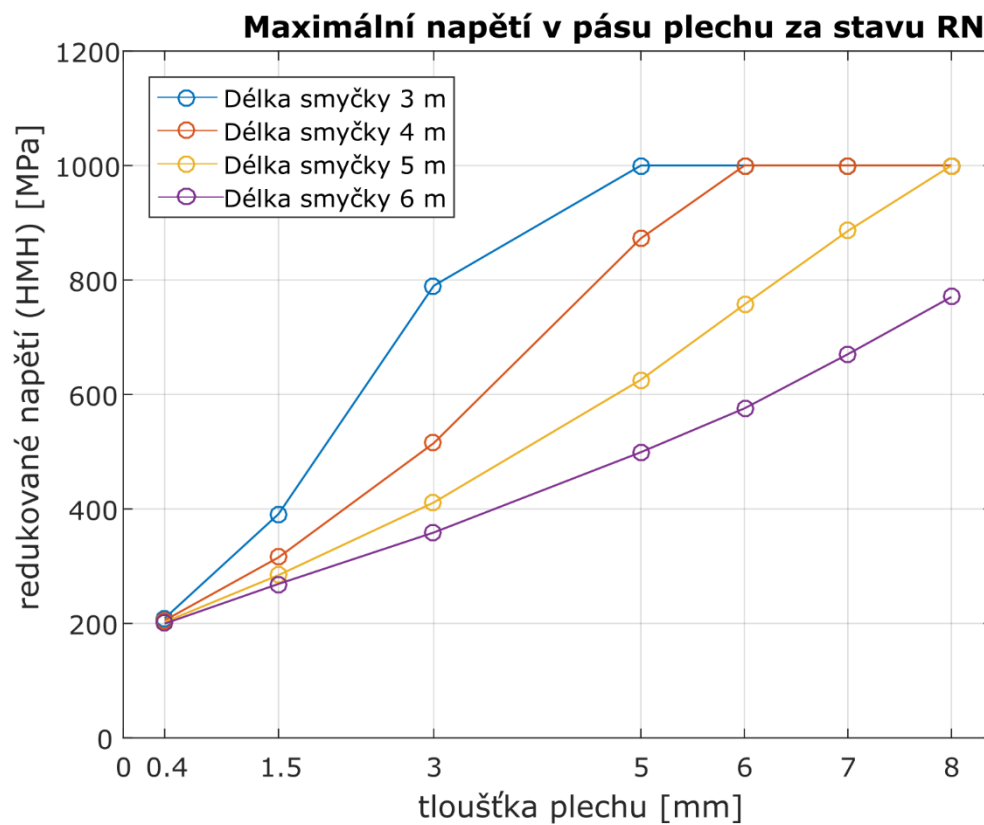


Obr. 35 Maximální průhyb plechu

Hodnoty redukovaných napětí byly zjišťovány pro dva napěťové stavy, a to pro stav RD uprostřed šířky plechu a pro stav RN na volném povrchu. Napětí na volném okraji bylo stanoveno pomocí hodnoty za stavu RD a korekčního součinitele K_{nd} . Maximální hodnoty jsou na Obr. 36 a Obr. 37.



Obr. 36 Maximální napětí za stavu RD



Obr. 37 Maximální napětí za stavu RN

Na Obr. 37 pro stav RN je nejlépe vidět, pro které parametry výpočtu při zásobě plechu v intervalu ($0 \div 1500 \text{ mm}$) bylo dosaženo MS pružnosti. Nejmenší napětí vyšla podle očekávání u nejtenčích plechů. Jejich hodnoty byly podobné pro všechny délky. Při těchto parametrech totiž maximální hodnoty vychází vždy na konci válečkového skluzu (Obr. 33 – fáze 2), kde poloměr křivosti oblouku je do značné míry ovlivněn geometrií válečkového skluzu.

3.2.2 Prezentace výsledků

Všechny výsledky je potřeba zpracovat do uživatelsky přehledného formátu a předat společnosti ŽDAS, a.s. Pro zpracování byl využit Microsoft Excel, poněvadž se jedná o program, který je dostupný na téměř každém počítači a většina uživatelů s ním má dostatečné zkušenosti.

Cílem bylo vytvořit program, který pro zadané vstupní parametry vyhledá požadované výstupy. Zároveň zadávání musí být uživatelsky jednoduché a výsledky přehledné. Problémem v této práci bylo, že každý výpočet obsahoval z důvodu rozdílné konvergence různé množství dat.

Řídící veličinou při tomto procesu je množství zásoby ve smyčce, které se pohybovalo v intervalu ($0 \div 1500 \text{ mm}$). Výsledky byly proto vypsány pro konkrétně zvolené hodnoty zásoby. Jako krok byla zvolena hodnota 10 mm, což znamená, že každý výpočet je vyhodnocen ve 151 krocích. Například výsledkový soubor pro parametry $L = 3 \text{ m}$; $t = 3 \text{ mm}$ vypadá podle Tab. 8. Data získaná z Ansysu byla v Matlabu proložena křivkou a zpětným dosazením byly získány výsledky pro požadované hodnoty zásoby. Maximální odchylky mezi původními daty a aproximovanou křivkou nebyly větší než 1 %. Průměrná hodnota takovéto chyby byla v řádu $10^{-4} \%$.

Zásoba Z	Napětí RD	Napětí RN	Průhyb
0 mm	30,3 MPa	36,4 MPa	13,6 mm
10 mm	99,1 MPa	119,5 MPa	111,5 mm
20 mm	127,7 MPa	153,8 MPa	157,4 mm
30 mm	149,6 MPa	180,3 MPa	192,4 mm
40 mm	168,1 MPa	202,6 MPa	221,9 mm
50 mm	184,2 MPa	222,0 MPa	247,7 mm
60 mm	198,5 MPa	239,2 MPa	271,0 mm
70 mm	211,4 MPa	254,8 MPa	292,4 mm
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
1430 mm	655,8 MPa	790,2 MPa	1327,7 mm
1440 mm	655,8 MPa	790,2 MPa	1333,2 mm
1450 mm	655,8 MPa	790,2 MPa	1338,6 mm
1460 mm	655,8 MPa	790,2 MPa	1344,0 mm
1470 mm	655,8 MPa	790,2 MPa	1349,3 mm
1480 mm	655,7 MPa	790,2 MPa	1354,7 mm
1490 mm	655,7 MPa	790,1 MPa	1360,1 mm
1500 mm	655,7 MPa	790,1 MPa	1365,4 mm

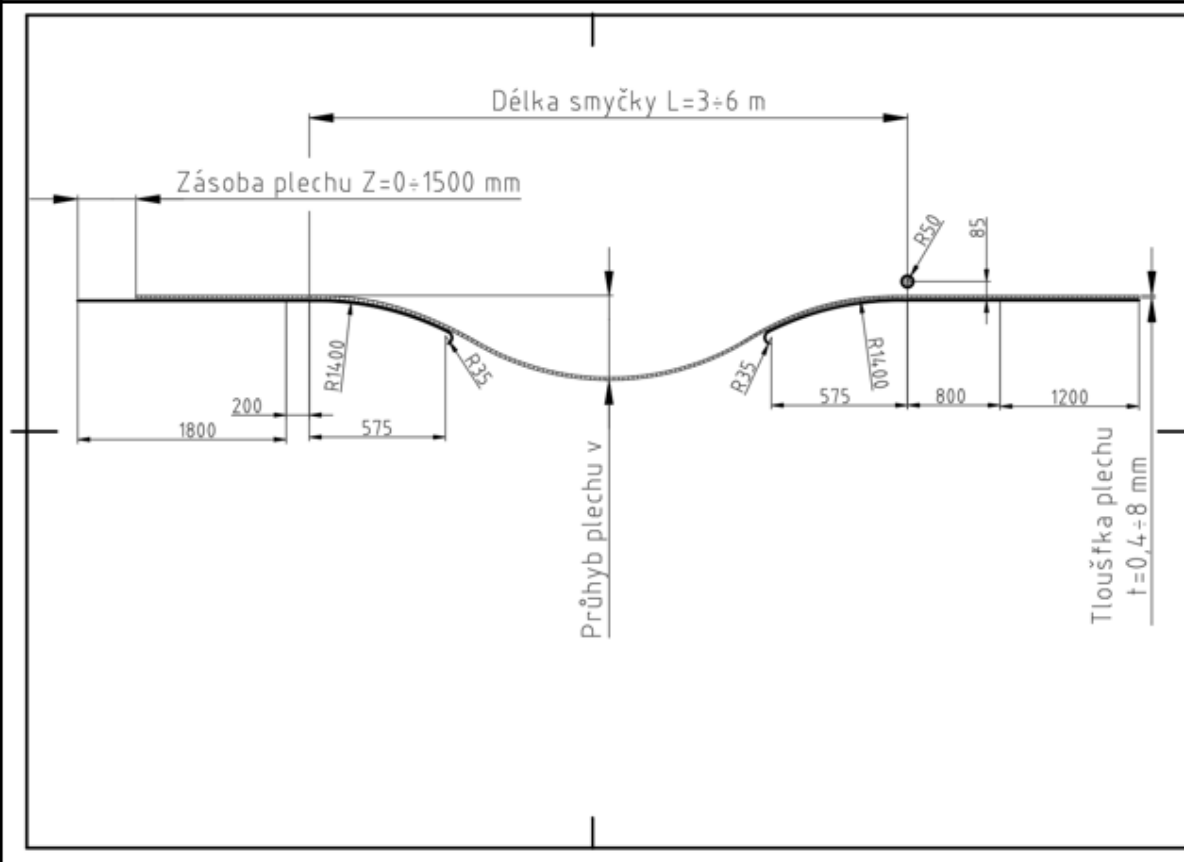
Tab. 8 Ukázka výsledkového souboru

Pro takto zpracovaná data už nebyl problém vytvořit program, kdy uživatel zadá parametry délky smyčky L , tloušťky plechu t a množství požadované zásoby Z . Výstupem budou veličiny zobrazené v Tab. 8. Ukázka výsledkového souboru je na Obr. 38. V praxi bude situace vypadat následovně.

- Společnosti ŽĎAS, a.s. přijde poptávka od zákazníka na realizaci vstupního úseku linky na zpracování plechu. Poptávka většinou obsahuje informace o parametrech lisu a materiálu, jenž se bude na lince zpracovávat. V rámci informací o lisu je také údaj o tom, jakou maximální délku pásu bude podavač krokově odebírat.
- Uživatel zadá parametry smyčky a použitého materiálu do programu. Požadovaná zásoba musí být dle podkladů zadavatele minimálně $1,5 \times$ větší, než je maximální odběr podavače.
- Na základě hodnot napětí zkontroluje, zda nebyla překročena mez kluzu v pásu plechu. Pokud se tak stane, může uživatel prověřit, zda by nebylo možné použít zásobní smyčku o jiné délce.
- Hodnoty maximálního průhybu se následně nastaví na snímačích sledujících tvar zásobní smyčky. Požadovaná zásoba ve smyčce je dosažena v momentě, kdy snímače zahlásí odpovídající průhyb plechu. Následně je možné spustit automatický režim.

Vyhodnocení napjatosti a deformace pásu plechu pro vybrané parametry zásobní smyčky

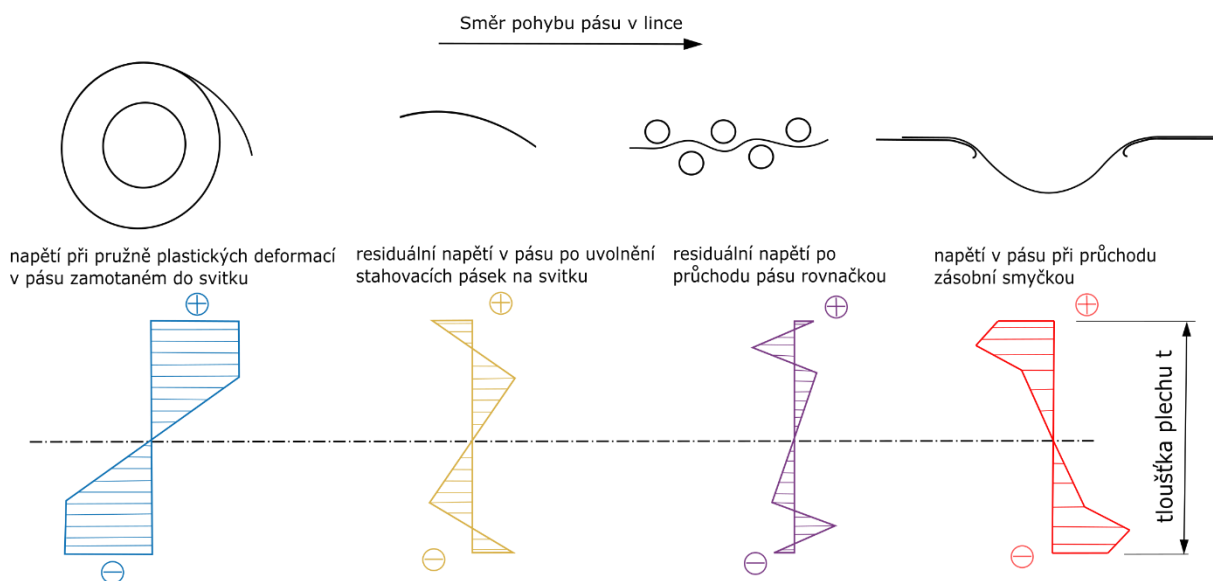
Délka smyčky L	4 m		
Tloušťka plechu t	8 mm		
Požadovaná zásoba Z	550 mm		
Mez kluzu materiálu	1000	MPa	
Napětí RD	878,7	MPa	
Napětí RN	-	MPa	
Kritické místo			
Průhyb	946,66	mm	
INFO	-		
INFO	Překročena mez kluzu na kraji plechu		



Obr. 38 Ukázka výsledkového programu

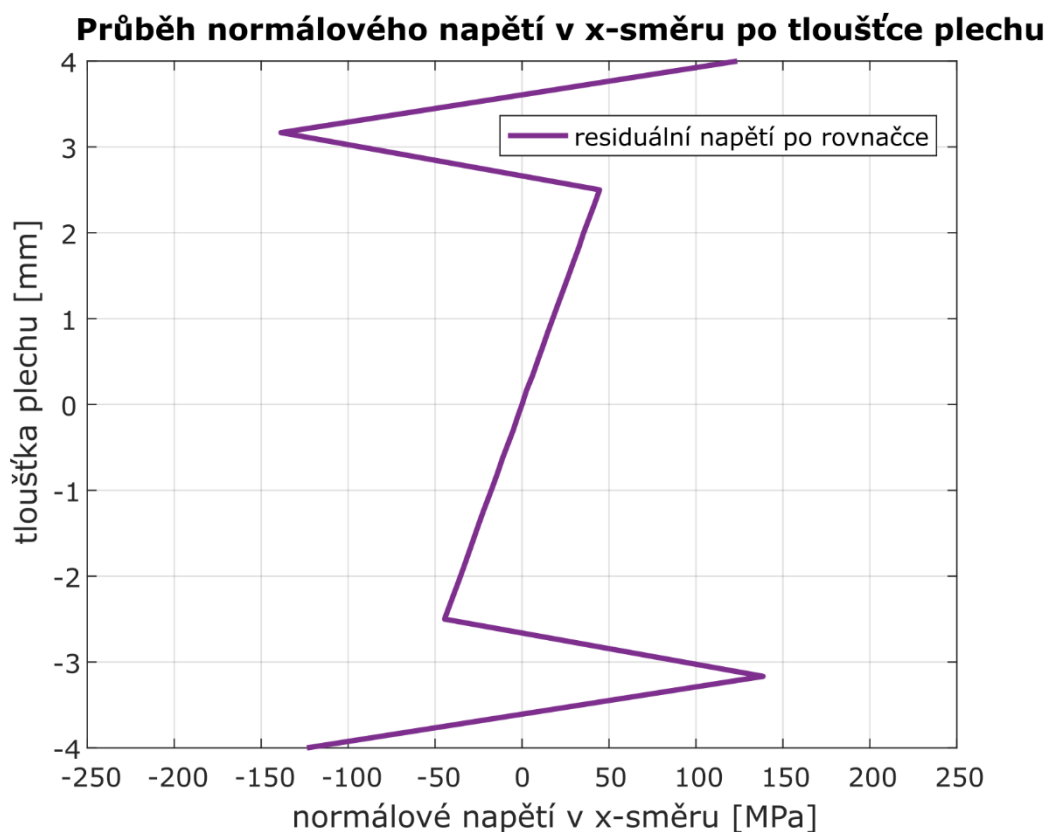
3.3 Výpočtový model III. úrovně

Výpočtový model III. úrovně byl se záměrem předvést, jak se změní průběh napětí po tloušťce plechu při uvažování zbytkového napětí, které vzniká po narovnání plechu v rovnačce. Předmětem této diplomové práce není stanovit jeho velikost. Nicméně z dostupných zdrojů je možné odhadnout alespoň jeho průběh po tloušťce plechu viz Obr. 39. K výpočtu byly stejně jako u modelu úrovně II. použity kvadratické rovinné prvky Plane 183. Z důvodu vytváření residuálního napětí byl počet prvků po tloušťce 35.



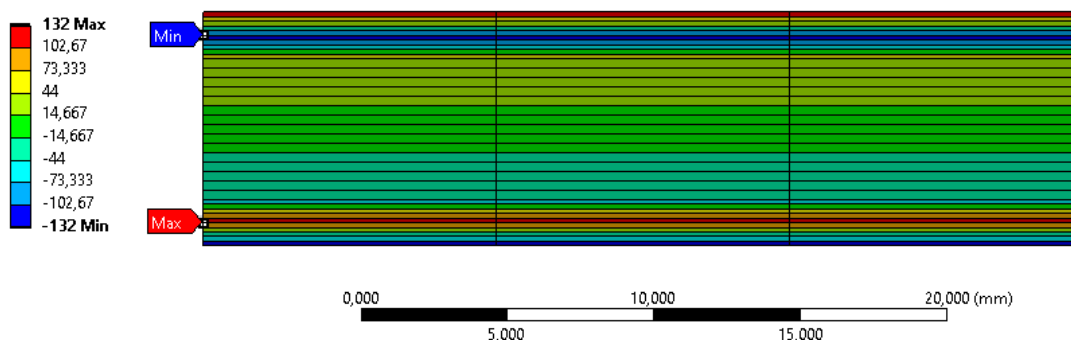
Obr. 39 Předpokládaný průběh normálového napětí v pásu plechu během průchodu linkou

Pro zjištění průběhu residuálního napětí za rovnačkou bylo využito výsledků diplomové práce [17]. Použitý průběh pro model III. úrovně je zobrazen na Obr. 40.



Obr. 40 Residuální napětí po rovnáče

Počáteční napjatost byla vygenerována teplotním namáháním pásu plechu. Konkrétní hodnoty napětí, jak už bylo napsáno v úvodu této kapitoly, neodpovídají skutečnosti. Hlavním cílem bylo pouze odhadnout jeho průběh po tloušťce a zkoumat jeho vliv na celkovou napjatost v pásu plechu. Tloušťka byla v tomto případě rozdělena na 35 vrstev, přičemž každé vrstvě byl předepsán rozdílný koeficient teplotní roztažnosti α . Při ohřátí plechu na teplotu okolo 50 °C bylo v tělese vygenerováno normálové napětí Obr. 41, které odpovídá residuálnímu napětí po průchodu rovnáčkou Obr. 40.



Obr. 41 Normálové napětí v x-směru vygenerováno teplotním namáháním [MPa]

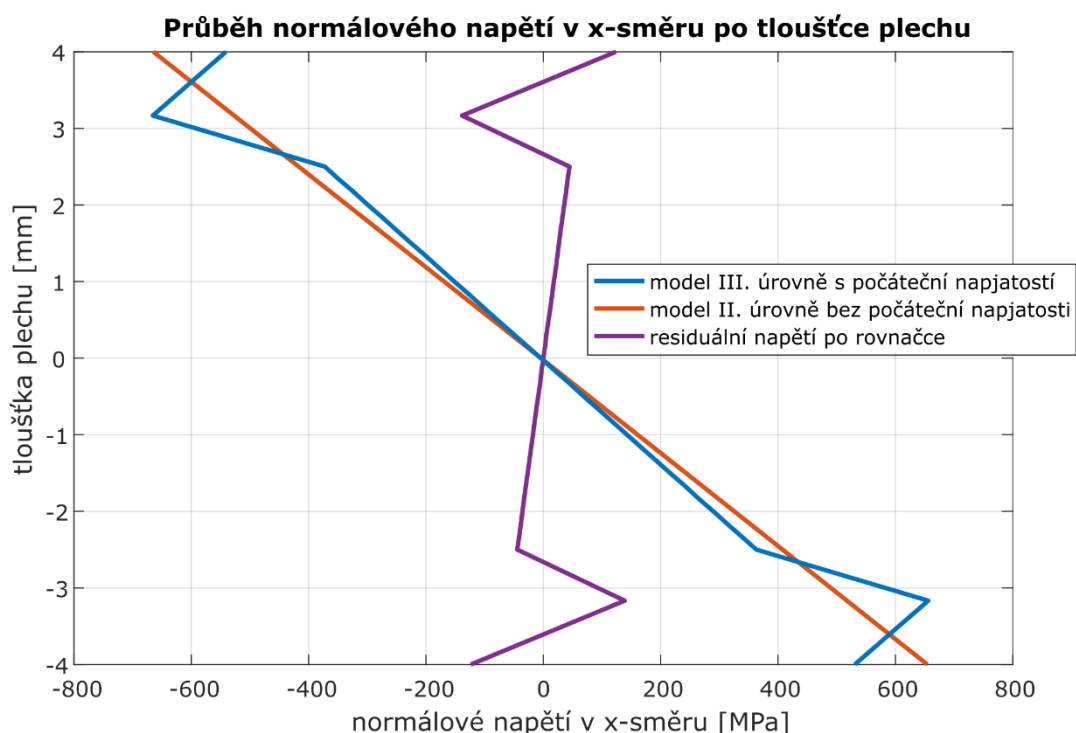
Výše uvedený stav napjatosti byl nyní stavem výchozím. Následovalo silové zatížení vlastní tíhou a deformační zatížení posuvem pásu o hodnotu 100 mm stejně jako u modelu II. úrovně. Nyní budou srovnány výsledky výpočtových modelů II. a III. mezi sebou. Z důvodu počátečního residuálního napětí je možné předpokládat, že kritickým místem již nemusí být vnější vlákna materiálu.

3.3.1 Zpracování výsledků

Z hlediska deformace se model s vygenerovanou počáteční napjatostí chová úplně stejně jako model bez ní. Tato skutečnost je zapříčiněna hlavně tím, že koeficienty teplotní roztažnosti α jsou po tloušťce rozloženy symetricky s opačným znaménkem. Takovéto uspořádání při teplotním namáhání v plechu nevyvolá žádnou deformaci.

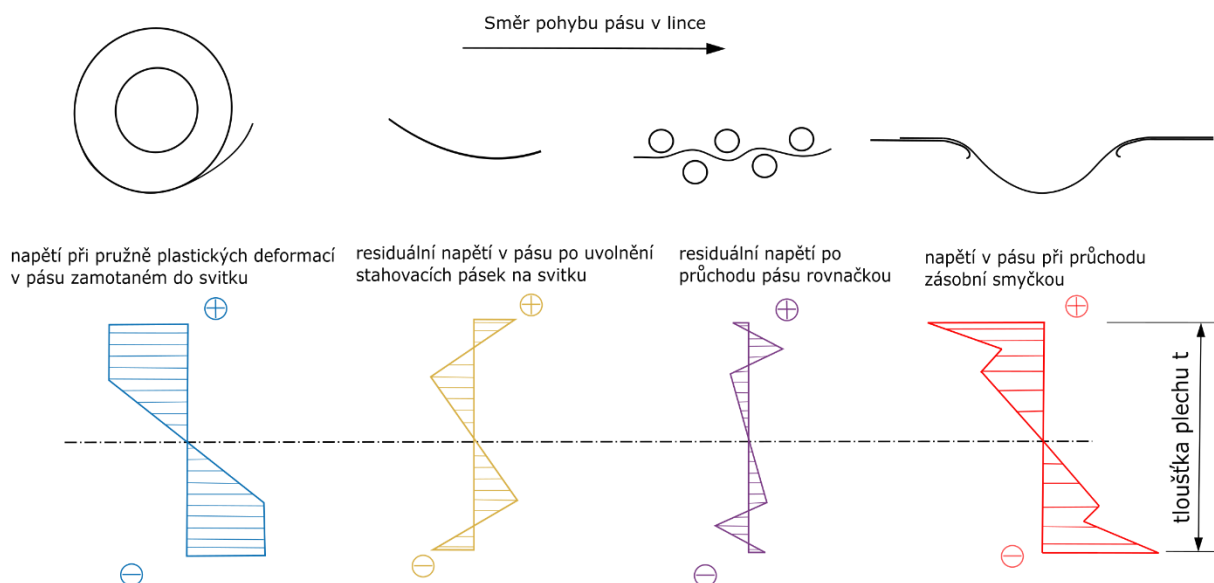
Napjatost je samozřejmě ovlivněna výchozím stavem. Oba výpočtové modely jsou ve 2D a odpovídají stavům RD. Teplotní namáhání tak vyvolá dvě shodná normálová napětí. Ve skutečnosti by však tato napětí stejně velká nebyla, protože by rovnáčka vyvolala normálové napětí v podélném směru a jemu odpovídající normálové napětí ve směru příčném dané Hookeovým zákonem. Proto bude srovnán pouze vliv počáteční napjatosti na hodnotu maximálního napětí v podélném směru. Alternativou by mohlo být provést výpočet za stavu RN, kde by z důvodu volného okraje zůstalo také napětí v příčném směru nulové. Z již výše zmíněných důvodů výše ale 2D model za stavu RN nedává shodné výsledky s 3D modelem, a proto byla tato možnost nevyužita.

Průběh normálového napětí v x-směru pro parametry smyčky $L = 3\text{ m}$, $t = 8\text{ mm}$ a $Z = 100\text{ mm}$ je možné vidět na Obr. 42. Z výsledků je možné vysledovat, že kritické místo se přesunulo z vnějších vláken do místa přibližně 1 mm pod povrchem. V tomto konkrétním případě se maximální hodnota nezvýšila.



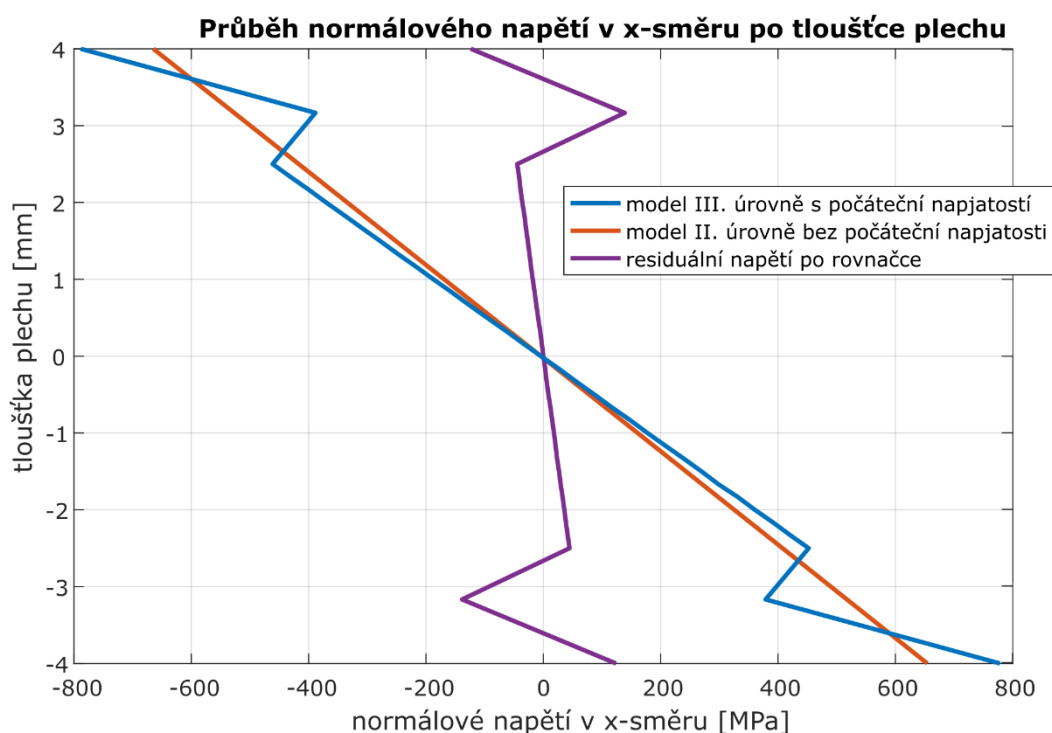
Obr. 42 Průběh normálového napětí pro modely II. a III. úroveň

Jako další případ je možné uvažovat, že plech se ze svitku odvíjí zespodu a do celého procesu rovnání tak vstoupí obráceně viz. Obr. 43. Tažené vlákno je tak nyní spodní.



Obr. 43 Předpokládaný průběh normálového napětí v pásu plechu během průchodu linkou – varianta II.

V této variantě bude mít residuální napětí opačné znaménko. Kritickým místem zůstane krajní vlákno, kde hodnota oproti modelu II. úrovně vzroste. Nárůst je zapříčiněn tím, že residuální i normálové napětí od ohybu budou mít v krajních vláknech stejné znaménko a dojde k jejich superpozici. Výsledky pro parametry smyčky $L = 3 \text{ m}$, $t = 8 \text{ mm}$ a $Z = 100 \text{ mm}$ lze vidět na Obr. 44.



Obr. 44 Průběh normálového napětí pro modely II. a III. úrovně – varianta II.

Výsledky této kapitoly poskytují kvantitativní zhodnocení vlivu zbytkové napjatosti na pás plechu v lince. Z konkrétních hodnot předpokládaného průběhu zbytkového napětí nelze vyvozovat žádné závěry, protože velikost zbytkového napětí po průchodu rovnačkou byla

pouze odhadnuta. Nicméně z výsledků zkoumání je zřejmé, že kritické místo může změnit polohu vzhledem k tloušťce plechu. V některých případech by tak mohlo dojít k nezanedbatelnému nárůstu redukovaného napětí. To vše bude záviset na uspořádání jednotlivých výrobních operací při zpracování pásu plechu a s tím souvisejícím průběhem a velikostí residuálního napětí. Řešitel diplomové práce tak navrhuje uvažovat minimální hodnotu koeficientu bezpečnosti vůči MS pružnosti 1,2.

ZÁVĚR

Diplomová práce byla zadána a zároveň řešena ve spolupráci s průmyslovým partnerem ŽDAS, a.s., konkrétně s Oddělením konstrukce zařízení pro zpracování válcovaných výrobků. Před samotným zhodnocením je vhodné si připomenout hlavní cíle této práce:

- Popis technologie vstupního úseku linky na zpracování plechu
- Získání vstupních údajů do výpočtu
- Vytvoření výpočtového modelu a jeho deformačně napěťová analýza
- Zpracování výstupních hodnot do výsledkového souboru
- Zvýšení úrovně výpočtového modelu po zahrnutí předchozí plastické deformace

K řešení problému v této diplomové práci bylo přistoupeno v systémovém pojetí. Tento postoj vyžaduje důkladné porozumění řešeného problému, a s tím související jeho podrobnou analýzu. Pro řešení byla vybrána taková metoda, která nejlépe zohlední systém podstatných veličin. V mé diplomové práci byl zvolen variační přístup řešení, konkrétně metoda konečných prvků ve své implicitní podobě.

V podkapitole 1.2 byl čtenář seznámen s technologií linky na zpracování plechu. Je zde detailně popsáno, jakým způsobem se pás do linky zavádí a jak celá linka pracuje v automatickém režimu. Poté bylo ve stručnosti uvedeno konstrukčních řešení jednotlivých částí linky, konkrétně zavážecího vozu, rozvíječky a rovnačky. Konstrukční řešení zásobní smyčky bylo popsáno důkladněji. Ke zpracování této kapitoly byly využity interní materiály [2] společnosti ŽDAS, a.s. zpracované panem Petrem Bukáčkem.

Podkapitoly 1.3 a 1.4 se zabývají teoretickým rozbohem problematiky nutné k vyřešení problému této diplomové práce. Jedná se především o teorii tenkostěnných těles, definici stavů rovinné deformace a rovinné napjatosti a vymezení mezního stavu pružnosti. Nadále bylo nutné čtenáře seznámit se základní teorií metody konečných prvků. Z podrobnějšího popisu použité metody byly vybrány ty kapitoly, jejichž nastudování bylo nutné k úspěšnému vyřešení problému této diplomové práce. Jedná se především o problematiku velkých deformací a kontaktních úloh.

Ve druhé kapitole byl popsán výpočtový model zásobní smyčky. Vstupní údaje byly zadány na konzultacích ve společnosti ŽDAS, a.s. Během řešení diplomové práce se ukázalo, že původní zadání pro délky smyčky $L = 2\text{ m}$ a $L = 3\text{ m}$ nedává smysl. Proto byly tyto parametry na konzultacích upraveny a namísto těchto dvou délek byla přidána délka $L = 6\text{ m}$. Dalším problémem bylo stanovení okrajových podmínek a vazeb výpočtového modelu. Ve ŽDAS, a.s. se totiž zaměřují pouze na vstupní úsek celé linky. To znamená, že nebylo možné získat informace o deformaci plechu v místě podavače do lisu. Pro nabytí těchto informací byla navštívena společnost BRANO a.s. v Hradci nad Moravicí, která je jedním z odběratelů linek. Zde bylo možné si prohlédnout výrobní proces v reálném provozu a poznat, jak je tento prostor linky řešen. Na základě poznatků byl navrhnut model, který je zobrazen na Obr. 22. Zatížení je aplikováno ve dvou zatěžovacích krocích. V prvním z nich působí na plech pouze gravitační síly. Nepatrný průhyb způsobí, že při následném horizontálním posunutí jednoho konce plechu se vytvoří požadovaný deformovaný tvar, a tím i potřebná zásoba pásu před lisem. Výpočtový model byl konzultován jednak s vedoucím práce panem doktorem Petrem Kubíkem, jednak s konzultanty ve ŽDASU panem Petrem Bukáčkem a panem Ing. Františkem Fickem.

Při kombinaci všech vstupních proměnných bylo potřeba výpočet provést celkem 28krát. K úloze je možné přistoupit vícero způsoby. Počáteční předpoklad zněl, že napjatost na šířce plechu nezávisí, a proto by bylo nejvýhodnější provést pouze jeden 2D výpočet za stavu RN

nebo RD. Při verifikaci těchto výsledků se ale ukázalo, že napjatost na volném okraji při výpočtu 2D úlohy neodpovídá stejné napjatosti ve 3D. Z toho důvodu bylo rozhodnuto, že bude zkoumáno, jakým způsobem ovlivňuje šířka plechu a volný okraj celkovou napjatost v pásu plechu. Za tímto účelem byl vytvořen model I. úrovně bez kontaktních vazeb, který je proveden ve 3D kvadratickými skořepinovými prvky a zatížen stejným namáháním jako model hlavní. Z výsledku vyplývá, že průměrná hodnota poměru mezi maximální hodnotou redukovaného napětí na okraji a uprostřed plechu vychází 1,205. Tento poměr byl nazván korekční koeficient a označen K_{nd} . Závěr bylo možné aplikovat pouze na dostatečně široké plechy, na nichž se volné okraje vzájemně neovlivňují. Proto byly stejné výpočty provedeny také pro plechy s šířkou menší než dostatečnou. Z těchto výsledků byl vyvozen závěr, že plechy úzké nejsou kritičtější než ty dostatečně široké, a proto je možné výsledky z hlavního modelu aplikovat na všechny šířky.

Výpočtový model II. úrovně již obsahoval všechny kontaktní vazby zobrazené na Obr. 22. Bylo provedeno celkem 28 výpočtů ve 2D za stavu RD. Výsledky za stavu RN byly získány vynásobením redukovaného napětí za stavu RD korekčním koeficientem k_{nd} . Ve všech výpočtech byla vytvořena zásoba 1500 mm. Výstupem bylo stanovení následujících veličin:

- a) Maximální možná zásoba pásu ve smyčce
- b) Maximální průhyb pásu plechu
- c) Maximální redukované napětí dle teorie HMM

K jejich zjištění byla použita dvě kritéria. Prvním z nich bylo kritérium maximálního redukovaného napětí, které nesmělo přesáhnout mez kluzu 1000 MPa. Pokud se tak nestalo, bylo využito kritérium maximální možné zásoby, jež byla na konzultacích ve ŽŽAS, a.s. stanovena na 1500 mm.

Výsledky bylo potřeba zpracovat do přehledného formátu. Byl vytvořen výsledkový program v MS Excel, který pro jednotlivé vstupní veličiny zobrazí požadované výstupy. Takový přístup byl zvolen proto, že MS Excel je v dnešní době široce dostupný program a většina uživatelů s ním má alespoň základní zkušenosti. Tímto byly splněny hlavní cíle kladené na tuto diplomovou práci.

V poslední kapitole byla úroveň výpočtového modelu zvýšena zahrnutím residuálního napětí vznikajícího v pásu plechu při jeho průchodu rovnačkou. Průběh tohoto napětí byl získán z diplomové práce [17]. Konkrétní hodnoty byly odhadnuty. Residuální napětí bylo vytvořeno teplotním namáháním, při kterém byla tloušťka plechu rozdělena na 35 vrstev s rozdílnou hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti α . Z výsledků zkoumání vyplývá, že kritické místo již nemusí být na krajních vláknech. V některých případech může dojít k nezanedbatelnému nárůstu redukovaného napětí pod povrchem. To vše bude záviset na uspořádání jednotlivých výrobních operací při zpracování pásu plechu a s tím souvisejícím průběhem a velikostí residuálního napětí. Navržená hodnota koeficientu bezpečnosti vůči MS pružnosti byla 1,2.

BIBLIOGRAFIE

- [1] JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4127-7.
- [2] BUKÁČEK, Petr. *Zásobní smyčka linky pro zpracování plechu*. ŽďAS, a.s., Žďár nad Sázavou, 2018.
- [3] ONDRÁČEK, Emanuel. *Mechanika těles: pružnost a pevnost II*. 4. V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3260-8.
- [4] MITTELSTADT, Christian. *Konstruktiver Leichtbau I: Folien zur Vorlesung "Leichtbau"*. TU Darmstadt, 2019.
- [5] JURAČKA, Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví*. 1. Brno: VUT Brno, b.r.
- [6] VLK, Miloš a Zdeněk FLORIAN. *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: VUT Brno, 2007. ISBN 80-214-0386-1.
- [7] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK, Jan VRBKA a Jiří BURŠA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. Brno: Cerm, 2004. ISBN 80-214-2592-X.
- [8] TRESCA, M. H. Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions. *Compte Rendu des Séances de l'Académie des Sciences*. 1864, , 754–758.
- [9] HENCKY, H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*. 1924, 4(4), 323–334.
- [10] HUBER, M. T. Właściwa praca odkształcenia jako miara wytężenia materiału. *Towarzystwo Politechniczne*. 1904, 22, 38–81.
- [11] MISES, von R. Mechanik der festen Körpern im plastisch-deformablen Zustand: Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. *Mathematisch-physikalische Klasse*. 1913, , 582–592.
- [12] PEŠINA, Eugen. *Základy užité teorie plasticity*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury ; Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966, 184 s. : obr., tabulky, grafy.
- [13] PETRUŠKA, Jindřich. MKP v inženýrských výpočtech. *VUT, FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky* [online]. Brno, b.r. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/images/opory/MKP%20v%20inzenyrskych%20vypoctech/RIV.pdf>
- [14] PETRUŠKA, Jindřich. *Nelineární úlohy mechaniky v MKP (přednášky)*. Brno, b.r.
- [15] TRZEPICINSKI, Tomasz a Hirpa LEMU. Effect of Computational Parameters on Springback Prediction by Numerical Simulation. *Metals* [online]. 2017, 7(9), 14 [cit.

2020-02-15]. DOI: 10.3390/met7090380. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2075-4701/7/9/380>

- [16] ŠEBEK, František. *Kontaktní problémy v metodě konečných prvků*. Brno, 2015.
- [17] ŠEBEK, František. *Výpočtová analýza rovnávání čtvercových tyčí*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně, FSI. Vedoucí práce Prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

P	$[-]$	problém
Ω	$[-]$	objekt
$\sum \Omega$	$[-]$	systém podstatných veličin
t_i	$[-]$	časový krok
l	$[m]$	délka
b	$[mm]$	šířka
t	$[mm]$	tloušťka
Γ	$[-]$	střednicová plocha
σ	$[MPa]$	normálové napětí
τ	$[MPa]$	smykové napětí
n	$[Nmm^{-1}]$	liniové silové toky
m	$[Nmm^{-1}]$	liniové momentové toky
q	$[Nmm^{-1}]$	liniové silové toky od posouvající síly
Ω_D	$[-]$	elementární prvek desky
u	$[mm]$	posuv ve směru x
v	$[mm]$	posuv ve směru y
w	$[mm]$	posuv ve směru z
r	$[mm]$	poloměr
γ	$[-]$	úhlová přetvoření
ε	$[-]$	délková přetvoření
ν	$[rad]$	úhel natočení
B	$[MPa\ mm^3]$	ohybová tuhost desky
μ	$[-]$	Poissonův poměr
E	$[MPa]$	Youngův modul pružnosti
$\sigma_{red}^{max\tau}$	$[MPa]$	redukováné napětí podle podmínky max τ
σ_k	$[MPa]$	materiálová charakteristika mez kluzu
σ_{red}^{HMH}	$[MPa]$	redukováné napětí podle podmínky HMH
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	$[MPa]$	maximální, střední a minimální hlavní napětí
σ_R	$[MPa]$	residuální napětí
σ_{PP}	$[MPa]$	pružně plastické napětí
σ_{fE}	$[MPa]$	fiktivní elastické napětí
Π	$[J]$	celková potenciální energie tělesa
W	$[J]$	energie napjatosti tělesa
P	$[J]$	potenciál vnějších sil
N_i	$[-]$	bázové funkce
U	$[mm]$	matice deformačních parametrů
K	$[Nmm^{-1}]$	celková matice tuhosti
F	$[N]$	celková matice zatížení
X_i	$[mm]$	nedeformované souřadnice tělesa
ε_{ij}	$[-]$	inženýrský tenzor přetvoření
E^L_{ij}	$[-]$	Green Lagrangeův tenzor přetvoření
k_n	$[Nmm^{-1}]$	normálová tuhost kontaktu
x_p	$[mm]$	hodnota penetrace kontaktních povrchů
n	$[-]$	počet podkroků
K_{ti}	$[Nmm^{-1}]$	tangenciální matice tuhosti
R_i	$[N]$	residuum

Re	$[MPa]$	mez kluzu materiálu
Rm	$[MPa]$	mez pevnosti materiálu
L	$[m]$	rozteč válečkových skluzů
Z	$[mm]$	zásoba pásu ve smyčce
g	$[ms^{-2}]$	gravitační zrychlení
K_{nd}	$[-]$	korekční součinitel
α	$[K^{-1}]$	koefficient teplotní roztažnosti materiálu

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Dispozice vstupního úseku [2]
Obr. 2 Popis zařízení – rozvíječka + zavážeč vřz [2]
Obr. 3 Popis zařízení – rovnačka [2]
Obr. 4 Popis zařízení – zásobní smyčka [2]
Obr. 5 Těleso typu stěna [4]
Obr. 6 Napětí působící na tělesu typu stěna (vlevo) a liniové silové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]
Obr. 7 Těleso typu deska [4]
Obr. 8 Normálové napětí působící na těleso typu deska (vlevo) a liniové momentové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]
Obr. 9 Smykové napětí působící na těleso typu deska (vlevo) a liniové momentové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]
Obr. 10 Smykové napětí působící na těleso typu deska (vlevo) a liniové silové toky působící na střednicové ploše (vpravo) [4]
Obr. 11 Zatížení mezikruhové desky [3]
Obr. 12 Deformace elementárního prvku [3]
Obr. 13 Stav rovinné deformace uprostřed plechu
Obr. 14 Stav rovinné napjatosti na volných okrajích
Obr. 15 Porovnání stavů RN a RD v Mohrově rovině
Obr. 16 Zobrazení fiktivní tahové napjatosti na elementární krychli [7]
Obr. 17 Residuální napětí
Obr. 18 Newton Raphsonova iterační metoda
Obr. 19 Modifikovaná Newton Raphsonova iterační metoda
Obr. 20 Zobrazení vstupních parametrů na výkrese
Obr. 21 Geometrie válečkového skluzu (zjednodušeno) [2]
Obr. 22 Model okrajových podmínek, vazeb a zatížení
Obr. 23 Celková deformace modelu I. úrovně [mm]
Obr. 24 Deformace po šířce plechu
Obr. 25 Napjatostní stavy na pásu plechu
Obr. 26 Průběh redukovaného napětí po šířce plechu
Obr. 27 Redukované napětí (von-Mises) – horní vlákno (tlak)
Obr. 28 Redukované napětí (von-Mises) – spodní vlákno (tah)
Obr. 29 Průběh redukovaného napětí pro různé šířky plechu
Obr. 30 Průběh redukovaného napětí na spodním vlákne pro úzké plechy
Obr. 31 Průběh redukovaného napětí na horním vlákne pro úzké plechy
Obr. 32 Deformace pásu v zásobní smyčce pro parametry $L = 3 \text{ m}$, $t = 8 \text{ mm}$
Obr. 33 Místa s maximální hodnotou redukovaného napětí
Obr. 34 Maximální zásoba plechu
Obr. 35 Maximální průhyb plechu
Obr. 36 Maximální napětí za stavu RD
Obr. 37 Maximální napětí za stavu RN
Obr. 38 Ukázka výsledkového programu
Obr. 39 Předpokládaný průběh normálového napětí v pásu plechu během průchodu linkou
Obr. 40 Residuální napětí po rovnačce
Obr. 41 Normálové napětí v x-směru vygenerováno teplotním namáháním [MPa]
Obr. 42 Průběh normálového napětí pro modely II. a III. úrovně
Obr. 43 Předpokládaný průběh normálového napětí v pásu plechu během průchodu linkou – varianta II.
Obr. 44 Průběh normálového napětí pro modely II. a III. úrovně – varianta II.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Typy tenkostěnných těles [3]

Tab. 2 Typy kontaktních vazeb

Tab. 3 Parametry modelu I. úrovně

Tab. 4 Srovnání výpočtů při použití různých typů konečných prvků

Tab. 5 Hodnoty napětí pro kritická místa

Tab. 6 Hodnoty korekčního součinitele pro různé parametry smyčky

Tab. 7 Kombinace vstupních parametrů

Tab. 8 Ukázka výsledkového souboru